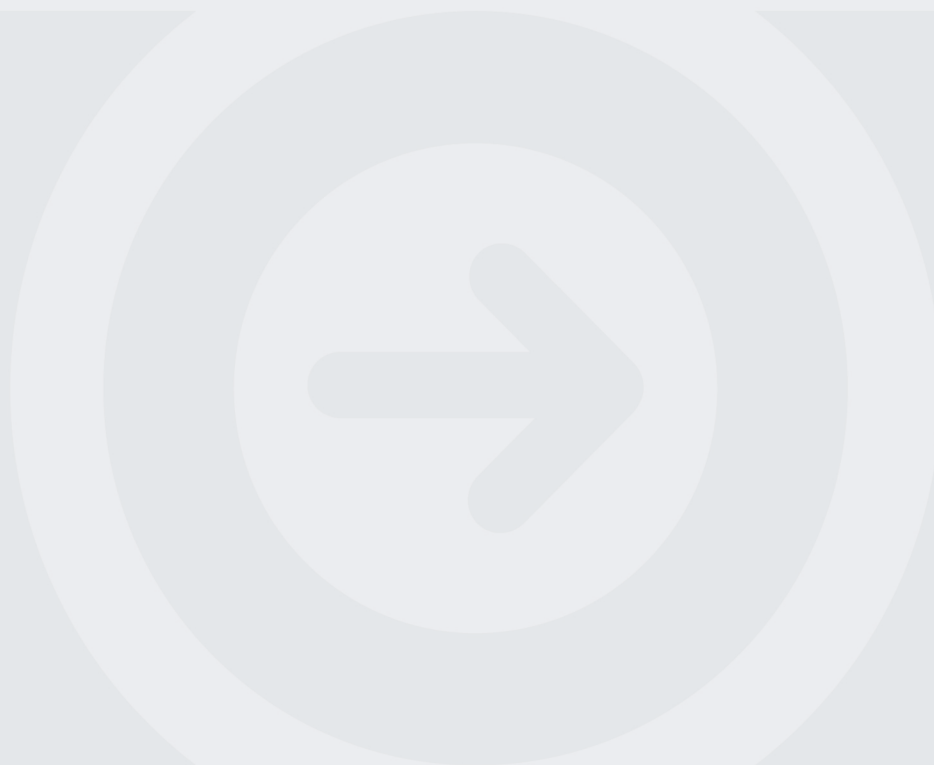


## **Uma perspetiva operacional sobre a aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia**

**LUÍS CÉSAR FERREIRA COIMBRA**

Julho de 2019





**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Uma perspetiva operacional sobre a aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia**

**Luís César Ferreira Coimbra**



**2019**

(página propositadamente em branco)



**Instituto Superior de Engenharia do Porto**

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA

## **Uma perspetiva operacional sobre a aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia**

*An operational perspective on the application of borehole inclinometers in  
geotechnical engineering*

**Luís César Ferreira Coimbra**

**1980874**

*Projeto apresentado ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de **Mestre em Engenharia Geotécnica e Geoambiente**, realizado sob a orientação dos Doutores Francisco Manuel Gonçalves Alves Salgado, Investigador Principal do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), e João Paulo Meixedo dos Santos Silva, Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Geotécnica do ISEP.*



(página propositadamente em branco)

## **Júri**

### **Presidente**

Doutor Helder Gil Iglésias de Oliveira Chaminé

*Professor Coordenador com Agregação, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor João Paulo Meixedo dos Santos Silva

*Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto*

Doutor Francisco Manuel Gonçalves Alves Salgado

*Investigador Principal, Laboratório Nacional de Engenharia Civil*

Doutora Maria Isabel Gonçalves Fernandes

*Professora Auxiliar com Agregação, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa*

---

*A dissertação de **mestrado em engenharia geotécnica e geoambiente** (MEGG) foi apresentada e defendida em prova pública, por **Luis César Ferreira Coimbra**, no Auditório de Geotecnia do Departamento de Engenharia Geotécnica (ISEP) em 30 de Setembro de 2019 mediante o júri nomeado, em que foi atribuída, por unanimidade, a classificação final de **18 (dezoito) valores**, cuja fundamentação se encontra em acta. Todas as correções pontuais determinadas pelo júri, e só essas, foram efectuadas.*

---

***Dedico esta tese....***

*Aos meus Pais, por terem sempre respeitado a minha individualidade e me terem dado sempre a oportunidade de errar.*

*À minha querida mulher Isabel Barbosa, pelo apoio incansável ao longo dos últimos anos, apesar das minhas ausências, muitas vezes presentes, e das minhas oscilações de humor.*

(página propositadamente em branco)

## **Agradecimentos**

Esta dissertação deriva da minha atividade profissional no Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), designadamente ao longo dos períodos 2006-2011 e 2014-2019. Foi um processo cumulativo ao longo do qual pude contar com o apoio, a experiência, o conhecimento e a confiança de um grupo de trabalho de excelência com quem tive oportunidade de crescer pessoal e profissionalmente. Portanto, manifesto o meu profundo agradecimento a todos os meus colegas de trabalho pela atividade profissional que desempenham diariamente no NGUT. Este trabalho não teria sido possível sem a participação de todos, independentemente da categoria profissional que ocupam. No entanto, algumas pessoas tiveram uma influência mais direta no desenvolvimento deste trabalho:

António Coelho

Arlindo de Sousa

Cláudia Henriques

Francisco Salgado

Joana Carreto

Mariana de Carvalho

Da mesma forma, não teria sido possível elaborar este trabalho sem o reconhecimento, a liberdade e a confiança que me foram conferidas pelo LNEC, mais concretamente pelas chefias do DG e do NGUT, em despender do tempo e dos recursos necessários para concretizar este documento. O meu muito obrigado:

Francisco Salgado

Joana Carreto

Laura Caldeira

Expresso também a minha gratidão aos orientadores deste trabalho:

Francisco Salgado

João Meixedo

É preciso ainda não esquecer que a formação académica que tive no ISEP tem sido determinante no meu percurso profissional.

(página propositadamente em branco)

**Palavras-chave**

*Geotecnia, inclinómetro, observação, estabilidade, metrologia.*

**Resumo**

Neste trabalho explora-se o estado da arte da aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia. O tema é abordado estritamente sob o ponto de vista operacional, desde a evolução tecnológica dos dispositivos até ao processamento de dados, passando também pela instalação de tubos inclinométricos e pela manutenção dos equipamentos.

Neste documento introduzem-se também algumas informações relevantes sobre a manutenção de equipamentos e sobre a análise e o processamento de dados, algumas pouco conhecidas, outras inovadoras. No que respeita à manutenção dos equipamentos, fornecem-se elementos acerca da verificação e da calibração de inclinómetros, incluindo-se uma revisão sobre algumas metodologias que podem ser aplicadas no planeamento do calendário de calibrações. Relativamente à produção de resultados, apresentam-se algumas técnicas de cálculo que permitem dar continuidade a históricos de observação descontínuos, estimar a distorção ocorrida no terreno e, a partir desta, estimar coeficientes de segurança locais ou prever o tempo de vida útil das instalações inclinométricas. Por fim aborda-se a questão do erro de medição com algum detalhe, fornecendo-se as ferramentas necessárias à análise qualitativa e ao melhoramento da informação recolhida, com inclusão de algumas técnicas de análise inovadoras que permitem refinar o melhoramento da informação e estimar o erro associado aos resultados inclinométricos.

Acredita-se que o conteúdo deste documento será muito útil às equipas técnicas que trabalham com estes dispositivos, sejam estas dedicadas à análise geotécnica ou à execução de trabalhos de campo. Pois, a informação existente sobre o tema concentra-se quase exclusivamente na análise geotécnica. Portanto, justifica-se a elaboração de um documento dedicado ao estado da arte desta matéria sob uma perspetiva operacional, já que esta informação se encontra muito dispersa, incompleta e frequentemente desatualizada.



(página propositadamente em branco)

**Keywords**

*Geotechnics, inclinometer, monitoring, stability, metrology.*

**Abstract**

In this work the state of the art of the use of borehole inclinometers in geotechnical engineering is explored. The matter is approached strictly from the operational point of view, starting with the technological evolution of these devices and ending with the data processing and analysis, also passing through casing installation and equipment maintenance.

In this document, some relevant disclosures about equipment maintenance and data analysis and processing are also introduced, some little known, others innovative. Regarding equipment maintenance, elements are given about inclinometer verification and calibration, including a revision of some methodologies which can be applied to plan the calibrations' schedule. Regarding the production of monitoring results, some calculation techniques are presented, which allow the continuity of discontinuous historical records, the estimation of ground distortion and, based on the latter, the estimation of local safety factors or the prediction of the service life of inclinometer casings. Lastly, the measurement error is approached with some detail, providing the necessary tools to perform data quality analysis and improvement, including some innovative techniques which allow the refinement of the data quality and the estimation of the error included in the monitoring results.

It is believed that the content of this document will be very useful to the technical teams working with these devices, be they dedicated to geotechnical analysis or to field work. Existing information about this topic is focused almost exclusively on geotechnical analysis. Since the information on this matter from the operational point of view is very dispersed, incomplete and often outdated, a document dedicated to it is justified.

(página propositadamente em branco)

## ÍNDICE DE TEXTO

INTRODUÇÃO.....	1
OBJETIVOS .....	3
1. O INCLINÓMETRO COMO INSTRUMENTO DE OBSERVAÇÃO GEOTÉCNICA .....	5
1.1. Princípio de funcionamento .....	5
1.2. Enquadramento histórico.....	6
1.3. Aplicabilidade dos inclinómetros na observação geotécnica .....	9
2. TIPOS DE EQUIPAMENTO INCLINOMÉTRICO DISPONÍVEIS .....	15
2.1. Classificação dos tipos de equipamento inclinométrico .....	15
2.2. Tipos de sensor dos equipamentos inclinométricos (tecnologia) .....	15
2.2.1. Generalidades.....	15
2.2.2. Sensores baseados em ponte de Wheatstone .....	15
2.2.2.1. Contextualização .....	15
2.2.2.2. Sensores de nível eletrolítico .....	18
2.2.3. Sensores de corda vibrante .....	19
2.2.4. Sensores de servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética .....	20
2.2.5. Sensores baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS) .....	22
2.2.5.1. Contextualização .....	22
2.2.5.2. MEMS acelerométricos piezoelétricos .....	24
2.2.5.3. MEMS acelerométricos piezorresistivos.....	25
2.2.5.4. MEMS acelerométricos capacitivos.....	26
2.2.5.5. MEMS acelerométricos termorresistivos/convectivos.....	28
2.2.5.6. MEMS acelerométricos eletrolíticos.....	30
2.3. Planos de referência dos equipamentos inclinométricos .....	32
2.4. Portabilidade dos equipamentos inclinométricos .....	33
2.4.1. Generalidades.....	33
2.4.2. Equipamentos inclinométricos fixos .....	34
2.4.3. Equipamentos inclinométricos de sonda .....	36
3. INSTALAÇÕES INCLINOMÉTRICAS .....	39
3.1. Considerações iniciais .....	39

3.2. Tubos inclinométricos .....	39
3.2.1. Classificação, caracterização, aquisição e armazenamento de tubos inclinométricos ...	39
3.2.2. Material de construção dos tubos inclinométricos .....	40
3.2.3. Diâmetro interno dos tubos inclinométricos .....	42
3.2.4. Tipo de união entre troços de tubo inclinométrico .....	43
3.3. Instalações por acoplamento exterior ou por incorporação estrutural .....	45
3.4. Instalações em furo de sondagem .....	45
3.4.1. Sequência de procedimentos e condicionantes ao desempenho das instalações .....	45
3.4.2. Diâmetro do furo de sondagem .....	46
3.4.3. Comprimento do furo de sondagem .....	47
3.4.4. Montagem do tubo inclinométrico e respetiva introdução no furo de sondagem .....	48
3.4.5. Alinhamento das calhas inclinométricas .....	50
3.4.6. Encastramento do tubo inclinométrico .....	51
3.4.7. Preenchimento do espaço anelar entre o furo de sondagem e o tubo inclinométrico ..	54
3.4.8. Proteção do topo do tubo inclinométrico e identificação do sentido principal .....	56
3.5. Instalações verticais em aterro .....	57
3.6. Instalações verticais com observação interna de assentamentos .....	58
3.7. Instalações em vala ou trincheira .....	59
3.8. Proteção de dispositivos contra interferências eletromagnéticas .....	62
4. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS INCLINOMÉTRICOS .....	65
4.1. Procedimentos operacionais para a realização de campanhas inclinométricas .....	65
4.2. Critérios de execução e seleção de campanhas de referência .....	68
4.3. Sonda inclinométrica .....	69
4.3.1. Cuidados operacionais e principais medidas de manutenção .....	69
4.3.2. Recuperação de sondas inclinométricas .....	72
4.4. Dispositivo de referência para controlo da profundidade .....	73
4.5. Cabo de ligação e de controlo da profundidade .....	75
4.6. Unidades de alimentação elétrica e de aquisição de dados .....	76
4.7. Verificação e calibração de equipamentos inclinométricos .....	77
4.7.1. Generalidades .....	77
4.7.2. Verificação de equipamentos inclinométricos .....	78
4.7.2.1. Metodologias de verificação de equipamentos inclinométricos .....	78
4.7.2.2. Frequência de verificação metrológica dos equipamentos inclinométricos .....	80

4.7.3. Calibração de equipamentos inclinométricos .....	81
4.7.3.1. Seleção do equipamento de calibração .....	81
4.7.3.2. Frequência de calibração metrológica dos equipamentos inclinométricos .....	87
5. PROCESSAMENTO DE DADOS INCLINOMÉTRICOS .....	91
5.1. Conceitos fundamentais .....	91
5.2. Desvios incrementais e acumulados .....	94
5.3. Deslocamentos incrementais e acumulados .....	95
5.4. Resultante dos deslocamentos e respetiva orientação .....	97
5.5. Evolução dos deslocamentos ao longo do tempo .....	98
5.6. Uso de múltiplas referências na mesma instalação inclinométrica .....	100
5.7. Profundidade da medição de topo, uso de alonga e diferença tubo-terreno .....	103
5.8. Cálculo de distorções a partir de resultados inclinométricos .....	105
5.8.1. Estimativa das distorções ocorridas no terreno .....	105
5.8.2. Estimativa de um fator de segurança local a partir das distorções estimadas e dos parâmetros geotécnicos dos solos respetivos .....	107
5.8.3. Aplicação dos valores de distorção para efeitos de estimativa do tempo de vida útil das instalações inclinométricas .....	109
5.8.3.1. Estimativa da distorção do tubo e do valor máximo respetivo .....	109
5.8.3.2. Estimativa da distorção máxima de tubos inclinométricos em condições de “corte pleno” .....	115
5.9. Estimativa de momentos de flexão em elementos estruturais .....	119
5.10. Método alternativo de processamento de dados inclinométricos .....	122
5.11. InclinoReport: programa de processamento de dados inclinométricos .....	125
5.11.1. Considerações iniciais .....	125
5.11.2. Características comuns à generalidade dos programas de processamento de dados inclinométricos .....	125
5.11.3. Histórico e caracterização técnica do InclinoReport .....	126
5.11.4. Funcionalidades do InclinoReport .....	127
6. ANÁLISE QUALITATIVA, VALIDAÇÃO E CORREÇÃO DE DADOS INCLINOMÉTRICOS .....	129
6.1. Considerações iniciais .....	129
6.2. Erro típico de um sistema inclinométrico .....	130
6.2.1. Conceito de erro típico, valores de erro especificados e propagação em deslocamentos .....	130
6.2.2. Erro típico do sistema no cálculo de deslocamentos com múltiplas referências .....	133

6.3. Indicadores qualitativos das medições inclinométricas.....	135
6.3.1. Somas das leituras inclinométricas.....	135
6.3.2. Média das somas das leituras inclinométricas.....	136
6.3.3. Dispersão das somas das leituras inclinométricas.....	140
6.4. Detecção e correção de erros sistemáticos .....	145
6.4.1. Generalidades.....	145
6.4.2. Erro de alteração do desvio na origem ( <i>bias-shift error</i> ).....	145
6.4.3. Erro de rotação ( <i>rotation error</i> ) .....	152
6.4.4. Erro de profundidade ( <i>depth error</i> ).....	156
6.4.5. Erro de sensibilidade ( <i>sensitivity error</i> ) .....	158
6.4.6. Outras causas para a ocorrência de erros sistemáticos generalizados .....	163
6.4.7. Erros sistemáticos pontuais .....	165
6.5. Estimativa do erro em curvas de perfil .....	171
6.5.1. Procedimentos gerais de cálculo .....	171
6.5.2. Influência dos procedimentos de correção na estimativa do erro em curvas de perfil .....	174
7. TRABALHO FUTURO .....	177
7.1. Constituição de base dados geral das campanhas de observação inclinométrica detidas pelo Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).....	177
7.2. Otimização do aparato de verificação inclinométrica do Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).....	177
7.3. Otimização da estimativa do tempo de vida útil das instalações inclinométricas com base nos valores de distorção do tubo inclinométrico.....	178
7.4. Avaliação do impacto do erro intrínseco ao método convencional de cálculo na determinação de valores de deslocamento e da respetiva orientação em diversos casos de obra .....	178
7.5. Estudo do impacto da deriva do desvio na origem nas medições inclinométricas a longo prazo .....	178
7.6. Estudo aprofundado da ocorrência de erros de rotação e dos métodos de correção correntemente aplicados.....	179
7.7. Estudo alargado da aplicabilidade e da eficiência dos métodos de análise e de correção de dados inclinométricos apresentados nas secções 6.4.2 e 6.4.7.....	179
7.8. Desenvolvimento de algoritmos de auxílio à comparação topológica de curvas de perfil para efeitos de identificação de erros de rotação e de profundidade.....	179
7.9. Desenvolvimento futuro do InclinoReport.....	180

7.10. Outras propostas de trabalho futuro .....	185
8. CONCLUSÕES .....	187
8.1. Considerações iniciais .....	187
8.2. Resumo conclusivo .....	187
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	195





## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Princípio básico da inclinometria para levantamento de perfis em furos de sondagem (adaptado de SINCO, 2001; Stark & Choi, 2008). .....	5
Figura 2 – Exemplos de aplicação das primeiras metodologias para levantamento inclinométrico do perfil de furos de sondagem (adaptado de Haddock, 1931). .....	6
Figura 3 – Diagrama do circuito do primeiro inclinómetro moderno (adaptado de WES, 1963 - anexo C).....	9
Figura 4 – Enquadramento dos inclinómetros na classificação da instrumentação geotécnica (adaptado de Dunnicliff, 1988). .....	10
Figura 5 – Diagramas de circuito aplicáveis à instrumentação baseada em ponte de Wheatstone (adaptado de Dunnicliff, 1988). .....	16
Figura 6 – Exemplos de sensores de nível eletrolítico uniaxiais (em cima) e biaxiais (em baixo), com meia ponte de Wheatstone representada pelas resistências entre os pares de elétrodos AB e BC (adaptado de BesTech, 2017; Dunnicliff, 1988; Puccio, 2004; SPECTRON, 2009; TFC, 2017a, 2017b, 2017c). .....	19
Figura 7 – Diagrama de circuito e estrutura de um servoacelerómetro de equilíbrio de força (adaptado de Hernandez & Gichard, 1978). .....	21
Figura 8 – Acelerómetro capacitivo servoacelerado não diferencial (adaptado de Mukherjee et al., 2014). .....	27
Figura 9 – Acelerómetro capacitivo servoacelerado diferencial (adaptado de Wu, 2002). .....	27
Figura 10 – Sensores MEMS incorporados na instrumentação (in)clinométrica (adaptado de Sellers & Taylor, in: BiTech, 2008). .....	28
Figura 11 – Exemplo de sensor MEMS eletrolítico eletrorresistivo (adaptado de Jung et al., 2007). .....	31
Figura 12 – Exemplo de sensor MEMS eletrolítico capacitivo (adaptado de Ueda et al., 2006). .....	32
Figura 13 – Representação da relação entre a orientação de uma bitola com sensor inclinométrico convencional e o diâmetro ( $d$ ) do inclinómetro. ....	33
Figura 14 – Exemplo de uma instalação inclinométrica fixa (adaptado de GEOKON, 2017a; SISGEO, 2017a). .....	35
Figura 15 – Exemplo de um equipamento inclinométrico de sonda (adaptado de SISGEO, 2013a, 2011). .....	37
Figura 16 – Calhas inclinométricas e planos ortogonais correspondentes (adaptado de Coimbra, 2016). .....	40
Figura 17 – Exemplos da existência ou ausência de bisel em calhas e em rodas inclinométricas. ...	42
Figura 18 – Especificação geométrica para tubos de alumínio (adaptado de Coimbra, 2016; DSERVICE, 2017b; Nunes & de Sousa, 1986). .....	43

Figura 19 – Tipos de união entre troços de tubo inclinométrico (adaptado de ACE, 2017; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017b; RST, 2017).....	44
Figura 20 – Acessórios de obturação do fundo do tubo inclinométrico (adaptado de ACE, 2016a; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017c; HOLE, 2017; TECON, 2017). ....	48
Figura 21 – Procedimentos de obturação e selagem do fundo e das uniões do tubo inclinométrico (adaptado de Coimbra, 2016; SISGEO, 2016d).....	49
Figura 22 – Introdução do tubo inclinométrico no furo de sondagem (adaptado de ACE, 2016a; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017c; HOLE, 2017; SISGEO, 2016d; TECON, 2017).....	49
Figura 23 – Técnica de montagem referida por Dunnicliff (1988) para minimizar a torção contínua das calhas de rodagem ao longo do tubo. ....	50
Figura 24 – Alinhamento das calhas inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2016). ....	50
Figura 25 – Precauções adicionais a considerar para o dimensionamento da extensão do maciço de encastramento a executar (adaptado de Coimbra, 2016). ....	51
Figura 26 – Metodologias de estabilização do tubo inclinométrico na ausência de acessório de fixação incluso na respetiva peça de obturação (in ex.: Figura 20ab, 3.4.4) (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 1997). ....	52
Figura 27 – Metodologias de execução do maciço de encastramento (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 1997; SISGEO, 2013b).....	53
Figura 28 – Precauções a ter relativamente à remoção do encamisamento de um furo no decorrer da execução do preenchimento do espaço anelar com material granular solto (adaptado de Coimbra, 2016). ....	55
Figura 29 – Variação da resistência à compressão de uma mistura de cimento e bentonite em função da relação água: cimento (adaptado de Mikkelsen, 2002). ....	56
Figura 30 – Proteção de tubos inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2016; Nunes & de Sousa, 1986). ....	57
Figura 31 – Instalação faseada de tubos inclinométricos verticais associados a dispositivos para acompanhamento do perfil de assentamentos em profundidade (adaptado de Coimbra, 2016; SISGEO, 2013b). ....	59
Figura 32 – Instalação inclinométrica em solo compressível, associada a dispositivos ferromagnéticos para observação do perfil de assentamentos (adaptado de ACE, 2016b; Coimbra, 2016; SOIL, 2013). ....	59
Figura 33 – Método alternativo para instalação de dispositivos de observação no interior de obras de aterro (adaptado de Clements, 1982, in: Dunnicliff, 1988).....	61
Figura 34 – Esquemática da operação de sondas inclinométricas horizontais portáteis em instalações com uma extremidade do tubo acessível (adaptado de SINCO, 2004). ....	61
Figura 35 – Esquemática da operação de sondas inclinométricas horizontais portáteis em instalações com ambas as extremidades do tubo acessíveis (adaptado de SINCO, 2004). ....	62
Figura 36 – Procedimentos gerais para a realização de campanhas inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2016; Dunnicliff, 1988; GEONOR, 2017). ....	68

Figura 37 – Constituição interna de um inclinómetro com servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (adaptado de Coimbra, 2016, 2011). .....	70
Figura 38 – Pormenor dos elementos rolantes de uma sonda inclinométrica. Relação com os planos de medição e com o respetivo sinal de leitura (adaptado de Coimbra, 2016; GEONOR, 2017; GOUDA, 2017; SINCO, 2014, 2006b; SOIL, 2014d).....	71
Figura 39 – Tubo plástico com recorte em bisel para recuperação de sondas inclinométricas.....	73
Figura 40 – Dispositivos de referência para controlo da profundidade (adaptado de Coimbra, 2016; DGSI, 2014b, 2013c; GEOKON, 2016b, 2009a). .....	74
Figura 41 – Sonda inclinométrica com cabo não destacável de marcas metálicas. Relação entre o passo de leitura, a marcação do cabo e a distância entre rodas.....	76
Figura 42 – Exemplos de aparatos para verificação inclinométrica (adaptado de ASTM, 2012; GEOSYSTEMS, 2010). .....	80
Figura 43 – Exemplos de mesas rotativas (adaptado de Aerotech, 2010; Coimbra, 2011; Newport, 2010; RPI, 2010).....	82
Figura 44 – Relação entre a tolerância admissível ( $T'$ ) e a tolerância do equipamento sob calibração ( $T$ ), em função do Coeficiente de Incerteza do Ensaio ( <i>Test Uncertainty Ratio, TUR</i> ; adaptado de Coimbra, 2011).....	84
Figura 45 – Sentidos de medição inclinométrica e respetiva relação com a orientação azimutal dos deslocamentos e com os sinais dos ângulos medidos nos planos A e B (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 2006a). .....	91
Figura 46 – Resposta de um sensor inclinométrico em função da inclinação da sonda na respetiva direção.....	92
Figura 47 – Desvios incrementais de uma instalação inclinométrica nas direções A e B.....	95
Figura 48 – Geometria de uma instalação inclinométrica nas direções A e B (adaptado de Coimbra, 2016). .....	95
Figura 49 – Deslocamentos incrementais nas direções A e B (adaptado de Coimbra, 2016). .....	96
Figura 50 – Deslocamentos acumulados nas direções A e B (adaptado de Coimbra, 2016). .....	97
Figura 51 – Resultante dos deslocamentos acumulados e respetiva orientação (adaptado de Coimbra, 2016). .....	98
Figura 52 – Evolução da resultante dos deslocamentos e da respetiva orientação. Períodos de aceleração intermitentes com taxas de progressão variáveis (adaptado de Coimbra, 2016). .....	99
Figura 53 – Evolução da velocidade de progressão da resultante dos deslocamentos. Taxas de progressão diárias.....	99
Figura 54 – Evolução da resultante dos deslocamentos e da respetiva orientação. Taxa de progressão constante com aceleração de movimento (adaptado de Coimbra, 2016).....	100
Figura 55 – Aplicação do conceito de multi-referência ao processamento de dados inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2011).....	102

Figura 56 – Comparação de resultados provenientes de dois instrumentos distintos, processados com e sem a inclusão de múltiplas referências.....	103
Figura 57 – Ponto de referência de sondas inclinométricas clássicas e modernas (adaptado de SINCO, 2018).....	103
Figura 58 – Diferença tubo-terreno e profundidade da medição de topo (adaptado de Coimbra, 2007). ....	105
Figura 59 – Conceito associado à estimativa de distorções em solos a partir de resultados inclinométricos (adaptado de Salgado & Carvalho, 1999).....	106
Figura 60 – Resultante dos deslocamentos acumulados e respetiva distorção no solo.....	106
Figura 61 – Esquema representativo de uma curva tensão/deformação obtida a partir de ensaios laboratoriais de corte simples (adaptado de Salgado, 1995).....	107
Figura 62 – Estimativa da distorção total ( $\gamma$ ) em função da distorção horizontal ( $\gamma_h$ ) e da geometria da superfície de deslizamento provável (adaptado de Salgado & Carvalho, 1999). ....	108
Figura 63 – Deformação máxima acomodável por um tubo inclinométrico sem que a circulação de uma sonda seja comprometida (adaptado de Carvalho et al., 2016).....	110
Figura 64 – Conceito associado ao cálculo da distorção de tubos inclinométricos (adaptado de Carvalho et al., 2016). ....	112
Figura 65 – Geometria e distorção de um tubo inclinométrico (adaptado de Carvalho et al., 2016). ....	113
Figura 66 – Perfis de distorção horizontal do solo e de distorção total do tubo numa instalação inclinométrica (adaptado de Carvalho et al., 2016). ....	114
Figura 67 – Concetualização geral da deformação de um tubo em condição de “corte pleno” e da mecânica associada à transposição de um obstáculo lateral pelas rodas inclinométricas.....	115
Figura 68 – Valores máximos de distorção e de deslocamento para uma instalação inclinométrica vertical em condição de “corte pleno” e com inclinação compreendida entre $\pm 5^\circ$ .....	119
Figura 69 – Estimativa de curvatura a partir de deslocamentos inclinométricos pelo método de ajuste de arco de circunferência (adaptado de Ooi & Ramsey, 2003). ....	121
Figura 70 – Interdependência entre o cálculo de desvios nas direções A e B (adaptado de Lei et al., 2006). ....	122
Figura 71 – Erro de cálculo do método convencional de processamento de dados. Determinação das componentes de desvio ( $d$ ) ou de deslocamento incremental ( $\Delta d$ ) nas direções A e B, da resultante dos desvios ( $d_R$ ) ou dos deslocamentos incrementais ( $\Delta d_R$ ), e da respetiva orientação ( $\alpha$ ).....	124
Figura 72 – Erro típico de um sistema inclinométrico no cálculo de deslocamentos nas direções A e B com contribuição de uma ou de duas campanhas de referência.....	134
Figura 73 – Evolução da média das somas das leituras com deriva normal do desvio na origem. ....	137
Figura 74 – Evolução da média das somas das leituras com deriva anormal do desvio na origem do sensor B.....	137

Figura 75 – Esquematização da influência da deriva do desvio na origem na medição de inclinações (adaptado de Coimbra, 2011).....	139
Figura 76 – Evolução do desvio padrão das somas das leituras ao longo do tempo.....	141
Figura 77 – Deslocamentos acumulados de algumas campanhas com valores elevados de desvio padrão. ....	141
Figura 78 – Análise das somas das leituras em profundidade.....	142
Figura 79 – Ábaco para determinação do valor máximo do diferencial de dispersão ( $\Delta s$ ) para uma sonda com resolução 0,02 mm/un e $k = 25000$ (adaptado de Coimbra, 2011). ....	144
Figura 80 – Deslocamentos incrementais das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3). ....	147
Figura 81 – Somas das leituras das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3)....	148
Figura 82 – Deslocamentos acumulados das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3). Curvas obtidas (49 e 49R) e corrigidas pelos métodos das somas das leituras (49-Si e 49R-Si) e dos deslocamentos (49-D e 49R-D). ....	151
Figura 83 – Erro sistemático introduzido em resultados acumulados pela ocorrência dum <i>bias-shift</i> ( $\epsilon_{bs}$ ) ao longo de $n$ profundidades em instrumentos com resolução 0,01-0,02 mm/un (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000). ....	151
Figura 84 – Relação entre o ângulo de rotação do referencial de medição e o erro induzido nos deslocamentos calculados (adaptado de Mikkelsen, 2003).....	153
Figura 85 – Relação entre os sinais dos ângulos de rotação estimado ( $\vartheta$ ) e pretendido ( $\vartheta'$ ) em cada direção.....	154
Figura 86 – Correção de um erro de rotação devido a diferenças de alinhamento axial entre os sensores de dois sistemas inclinométricos. ....	155
Figura 87 – Magnitude do erro de rotação em função do angulo respetivo e do desvio da vertical na direção ortogonal (adaptado de Coimbra, 2011). ....	156
Figura 88 – Padrões de forma tipicamente produzidos pelo erro de profundidade em tubos com perfil em “S” e em “J” (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000). ....	157
Figura 89 – Exemplo de correção de um erro de sensibilidade devido a alterações ocorridas na unidade de aquisição do sistema inclinométrico. ....	160
Figura 90 – Magnitude do erro de sensibilidade em função do coeficiente de deriva respetivo e do desvio da vertical do tubo inclinométrico (adaptado de Coimbra, 2011).....	161
Figura 91 – Exemplo de correção de um perfil de somas tendencioso sem afetação dos valores de medição.....	162
Figura 92 – Correção de somas desviantes por compensação equitativa (adaptado de Coimbra, 2011). ....	166
Figura 93 – Somas de leituras das campanhas 45 e 51 na direção B (figuras 77 e 78, 6.3.3), pré e pós correção de erros pontuais através da média das somas.....	168

Figura 94 – Deslocamentos acumulados das campanhas 45, 45R, 50 e 51 nas direções A e B (figuras 77 e 78, 6.3.3), pré e pós correção de erros pontuais nas campanhas 45 e 50 através da média das somas. ....	168
Figura 95 – Correção de leituras pertencentes ao percentil 0,1 da distribuição de somas. Comparação de resultados obtidos com diferentes métodos de análise e de correção.....	170
Figura 96 – Fluxo de trabalho mais comum para o processamento de dados inclinométricos no NGUT.....	181
Figura 97 – Fluxo de trabalho sugerido para o processamento de dados inclinométricos no NGUT. ....	182

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 – Instrumentação geotécnica destinada à medição de deformações. Tipos de deformação medidos e principais aplicações (adaptado de Dunncliff, 1988).....	11
Quadro 2 – Instrumentação concorrente e complementar aos sistemas inclinométricos.....	12
Quadro 3 – Classificação dos MEMS em função do tipo de energia de ativação e das grandezas passíveis de se observar (adaptado de Korvink & Paul, 2006). ....	23
Quadro 4 – Categorização dos MEMS mecânicos em função do tipo de grandeza que medem e dos princípios de funcionamento aplicáveis (adaptado de Korvink & Paul, 2006).....	24
Quadro 5 – Sistemas inclinométricos fixos alternativos aos convencionais. ....	35
Quadro 6 – Principais características dos diferentes tipos de tubo inclinométrico disponíveis (adaptado de Coimbra, 2016; DGSI, 2013b; DSERVICE, 2017a; Dunncliff, 1988; GEOKON, 2017b; RST, 2017; SISGEO, 2016a, 2016b, 2016c, 2010). ....	41
Quadro 7 – Diâmetros de furo adequados a diferentes tamanhos de tubo (adaptado de Coimbra, 2016). ....	47
Quadro 8 – Medidas de proteção da instrumentação geotécnica fixa contra interferências eletromagnéticas (adaptado de Shoup, 1992). ....	63
Quadro 9 – Requisitos metrológicos para a execução de medições inclinométricas (adaptado de ISO, 2016). ....	83
Quadro 10 – Método de cálculo para estimativa da incerteza de medição introduzida pelo equipamento de calibração (adaptado de Coimbra, 2011). ....	85
Quadro 11 – Grandezas estimadas para os principais requisitos não metrológicos de uma mesa rotativa para execução de calibrações inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2011). ....	86
Quadro 12 – Vantagens e desvantagens dos tipos de acionamento mecânico mais adequados para um sistema de calibração inclinométrica (adaptado de Coimbra, 2011). ....	87
Quadro 13 – Metodologias normalmente utilizadas para a definição da periodicidade de calibração de instrumentos inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2016). ....	89
Quadro 14 – Constantes de proporcionalidade (k) dos principais fabricantes de inclinómetros (adaptado de GEOKON, 2014a, 2014b, 2009b; RST, 2010; SINCO, 2014, 2006a; SISGEO, 2013a; SOIL, 2014d, 2014e). ....	93
Quadro 15 – Condição de deformação localizada. Estimativa da distorção máxima para os diâmetros de tubo mais utilizados (adaptado de Carvalho et al., 2016). ....	111
Quadro 16 – Condição de deformação perfeitamente distribuída. Estimativa da distorção máxima para os diâmetros de tubo mais utilizados (adaptado de Carvalho et al., 2016). ....	111
Quadro 17 – Valores máximos de deformação de um tubo inclinométrico em condição de “corte pleno”.....	119
Quadro 18 – Principais fontes de erro em medições inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2001, 2000). ....	129



Quadro 19 – Ações de operação e de manutenção que minimizam a ocorrência de erros sistemáticos (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2006a). .....	130
Quadro 20 – Desempenho metrológico especificado pelos principais fabricantes de inclinómetros (adaptado de DGSi, 2014b, 2013c; GEOKON, 2014c; RST, 2010; SISGEO, 2011; SOIL, 2014c, 2014g). .....	131
Quadro 21 – Padrões de deslocamento típicos do erro de alteração do desvio na origem (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000). .....	146
Quadro 22 – Erro típico e erro estimado para as curvas de perfis acumulados das campanhas 45 e 51 (figuras 77 e 78acd, 6.3.3), cuja instalação tem cerca de 19,50 m de profundidade (39 secções). .....	173
Quadro 23 – Estimativas de erro pré e pós correção de erros sistemáticos pontuais na campanha 45 e 51 (figuras 93 e 94, 6.4.7), cuja instalação tem cerca de 19,50 m de profundidade (39 secções). .....	176
Quadro 24 – Lista de objetivos a implementar no InclinoReport.....	184

## ÍNDICE DE EXPRESSÕES MATEMÁTICAS

(1)	$F > I; I(N) = \rho_c \pi \frac{D_e^2}{4} l_e g; g \cong 9,81 \text{ m/s}^2$	52
(2)	água: cimento: areia $\cong 1: 2: 4$ (em peso); $0,1 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areia}} \leq 0,3 \text{ mm}$	52
(3)	água: cimento: areia: areão $\cong 1: 2: 4: 4$ (em peso); $0,1 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areia}} \leq 0,3 \text{ mm}$ ; $0,3 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areão}} \leq 3,0 \text{ mm}$	53
(4)	$V = k \pi l_e \frac{D_f^2 - D_e^2}{4}; 1,6 \leq k \leq 2,0$	53
(5)	cimento: água: bentonite $\cong 1,0: 6,6: 0,4$ (em peso); $f_c \cong 0,03 \text{ MPa}$	55
(6)	cimento: água: bentonite $\cong 1,0: 2,5: 0,3$ (em peso); $f_c \cong 0,69 \text{ MPa}$ ; $E \cong 68,9 \text{ MPa}$	55
(7)	$TUR = T/U$	84
(8)	$\mu \pm u_c = (m_1 \pm u + m_2 \pm u)/2 = \mu \pm u/\sqrt{2} \Rightarrow u = \pm u_c \sqrt{2}$	85
(9)	$\begin{cases} T \leq 2 u  \\ u[s] = 3600 \sin^{-1}(u/L); u = \pm 0,1\sqrt{2} \text{ mm}; L = 1 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T \leq 58,34 \text{ s} \\ u \cong \pm 29,170 \text{ s} \end{cases}$	85
(10)	$TUR \geq T/U; 4 \leq TUR \leq 6; T = 58,34 \text{ s} \Rightarrow \pm 9,7 \leq U \leq \pm 14,6 \text{ s}$	86
(11)	$\begin{cases} l_i^{A0} = k \sin \theta_i^0 + b_A \\ l_i^{A180} = k \sin \theta_i^{180} + b_A \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sin \theta_i^0 = \frac{l_i^{A0} - b_A}{k} \\ \sin \theta_i^{180} = \frac{l_i^{A180} - b_A}{k} \end{cases}; \theta_i^0 = -\theta_i^{180}$	92
(12)	$\begin{cases} l_i^{B0} = k \sin \beta_i^0 + b_B \\ l_i^{B180} = k \sin \beta_i^{180} + b_B \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sin \beta_i^0 = \frac{l_i^{B0} - b_B}{k} \\ \sin \beta_i^{180} = \frac{l_i^{B180} - b_B}{k} \end{cases}; \beta_i^0 = -\beta_i^{180}$	93
(13)	$m_i^A = \frac{l_i^{A0} - l_i^{A180}}{2k} = \frac{\sin \theta_i^0 + b_A - (\sin \theta_i^{180} + b_A)}{2} = \sin \theta_i; \theta_i^0 = -\theta_i^{180}$	93
(14)	$m_i^B = \frac{l_i^{B0} - l_i^{B180}}{2k} = \frac{\sin \beta_i^0 + b_B - (\sin \beta_i^{180} + b_B)}{2} = \sin \beta_i; \beta_i^0 = -\beta_i^{180}$	93
(15)	$\begin{cases} d_i^A = L m_i^A = L \sin \theta_i \\ d_i^B = L m_i^B = L \sin \beta_i \end{cases}$	94
(16)	$\begin{cases} D_j^A = \sum_i^j d_i^A = L \sum_i^j m_i^A \\ D_j^B = \sum_i^j d_i^B = L \sum_i^j m_i^B \end{cases}$	94
(17)	$\begin{cases} \Delta d_{p,i}^A = d_{p,i}^A - d_{r,i}^A \\ \Delta d_{p,i}^B = d_{p,i}^B - d_{r,i}^B \end{cases}$	96
(18)	$\begin{cases} \Delta D_{p,j}^A = D_{p,j}^A - D_{r,j}^A \\ \Delta D_{p,j}^B = D_{p,j}^B - D_{r,j}^B \end{cases}$	96
(19)	$\Delta_{p,i}^R = \sqrt{(\Delta_{p,i}^A)^2 + (\Delta_{p,i}^B)^2}$	97

$$(20) \quad \alpha_{p,i} = \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) \dots\dots\dots 97$$

$$(21) \quad \alpha_{p,i} = \begin{cases} 0; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B = 0 \\ \pi/2; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B > 0 \\ -\pi/2; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B < 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A); \Delta_{p,i}^A > 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) + \pi; \Delta_{p,i}^A < 0 \wedge \Delta_{p,i}^B \geq 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) - \pi; \Delta_{p,i}^A < 0 \wedge \Delta_{p,i}^B < 0 \end{cases} \dots\dots\dots 97$$

$$(22) \quad \begin{cases} \Delta d_{p,i}^r = d_{p,i} - d_{r,i} \\ \Delta D_{p,j}^r = D_{p,j} - D_{r,j} \end{cases} \wedge \begin{cases} \Delta d_{p+1,i}^{r+1} = d_{p+1,i} - d_{r+1,i} \\ \Delta D_{p+1,j}^{r+1} = D_{p+1,j} - D_{r+1,j} \end{cases} \dots\dots\dots 102$$

$$(23) \quad \begin{cases} \Delta d_{p+1,i}^r = \Delta d_{p,i}^r + \Delta d_{p+1,i}^{r+1} \\ \Delta D_{p+1,j}^r = \Delta D_{p,j}^r + \Delta D_{p+1,j}^{r+1} \end{cases} \dots\dots\dots 102$$

$$(24) \quad \Delta_t = \text{Cota do topo do tubo} - \text{Cota do terreno} \dots\dots\dots 105$$

$$(25) \quad P_t = nL - l - m \dots\dots\dots 105$$

$$(26) \quad P_t^{corr} = P_t - \Delta_t \dots\dots\dots 105$$

$$(27) \quad \gamma_h = d/h \dots\dots\dots 106$$

$$(28) \quad \gamma_{p,i}^h [\%] = 100 \frac{\Delta_{p,i}^R - \Delta_{p,i-1}^R}{L \cos \varphi_{p,i}} \dots\dots\dots 106$$

$$(29) \quad \varphi_{p,i} = \sin^{-1} \frac{\Delta_{p,i}^R - \Delta_{p,i-1}^R}{L} \dots\dots\dots 106$$

$$(30) \quad FSL = \tau_{p,i} / C_u (\text{pico}) \dots\dots\dots 107$$

$$(31) \quad \tau = \frac{\gamma}{1/G_i + \gamma R_f / \tau_{rot}} \dots\dots\dots 107$$

$$(32) \quad S = \frac{\tau}{\tau_{rot}} = \frac{\gamma G_i}{\tau_{rot} + G_i \gamma R_f} \dots\dots\dots 108$$

$$(33) \quad FSL = S^{-1} = \frac{\tau_{rot} + G_i \gamma R_f}{\gamma G_i} \dots\dots\dots 108$$

$$(34) \quad FSL = 1 = \frac{\tau_{rot} + G_i \gamma_{rot} R_f}{\gamma_{rot} G_i} \Leftrightarrow \gamma_{rot} = \frac{\tau_{rot}}{G_i (1 - R_f)} \dots\dots\dots 108$$

$$(35) \quad \gamma_{p,i} = \gamma_{p,i}^h / \cos \omega_i \dots\dots\dots 108$$

$$(36) \quad (\tau - \tau_i) = \frac{\gamma}{1/G_i + \gamma R_f / (\tau_{rot} - \tau_i)}; R_f = \frac{\tau_{rot} - \tau_i}{\tau_{ult} - \tau_i} \dots\dots\dots 109$$

$$(37) \quad \gamma_{rot} = \frac{(\tau_{rot} - \tau_i)}{G_i (1 - R_f)} \dots\dots\dots 109$$

$$(38) \quad \theta_{loc} = \tan^{-1} \frac{\phi_t - \phi_s}{L_s/2} \dots\dots\dots 110$$

$$(39) \quad \begin{cases} r_2^2 = (r_1 + \phi_s)^2 + (L_s/2)^2 \\ r_2 = r_1 + \phi_t \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} r_1 = \frac{(L_s/2)^2 + \phi_s^2 - \phi_t^2}{2(\phi_t - \phi_s)} \\ r_2 = r_1 + \phi_t \end{cases} \dots\dots\dots 111$$

(40)	$\theta_{dis} = L/r_2$ .....	111
(41)	$\gamma_{tm} [\%] = 100 \frac{d_i - d_{i-1}}{L \cos \theta}$ ; $\theta = \theta_{loc} \vee \theta = \theta_{dis}$ .....	111
(42)	$\vec{I} = A\hat{a} + B\hat{b} + Z\hat{z}$ ; $\ \vec{I}\  = L$ .....	112
(43)	$\begin{cases} A = \ \vec{d}^A\  \\ B = \ \vec{d}^B\  \\ Z = \sqrt{L^2 - A^2 - B^2} \end{cases}$ .....	112
(44)	$\vec{I}_i \cdot \vec{I}_{i-1} = \ \vec{I}_i\  \ \vec{I}_{i-1}\  \cos \vartheta_i \Leftrightarrow \vartheta_i = \cos^{-1} \frac{\vec{I}_i \cdot \vec{I}_{i-1}}{\ \vec{I}_i\  \ \vec{I}_{i-1}\ }$ .....	113
(45)	$\gamma_i^t [\%] = 100 \tan \vartheta_i$ .....	113
(46)	$\begin{cases} r = (r + x) \cos \alpha_h \\ \emptyset_c = (l_t + 2x) \cos \alpha_h \end{cases}; l_t = l_h + 2r \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{rl_h}{\emptyset_c - 2r} - r \\ \alpha_h = \cos^{-1} \frac{\emptyset_c - 2r}{l_h} \end{cases}$ .....	116
(47)	$\begin{cases} F_x = F \cos(\alpha_h + \varphi)/2 \\ F_y = F \sin(\alpha_h + \varphi) \end{cases}$ .....	116
(48)	$\begin{cases} F_{xt} = F_x \cos(\alpha_r - \alpha_h) \\ F_{xn} = F_x \sin(\alpha_r - \alpha_h) \\ F_{xp} = F_x \cos \alpha_h \\ F_{xq} = F_x \sin \alpha_h \end{cases}; \alpha_r = \cos^{-1}(1 - h/r)$ .....	116
(49)	$\begin{cases} F_{yt} = F_y \sin(\alpha_h - \alpha_r) \\ F_{yn} = F_y \cos(\alpha_h - \alpha_r) \end{cases}; \alpha_r = \cos^{-1}(1 - h/r)$ .....	116
(50)	$F_t^M = F_t \cos(\alpha_r - \alpha_h)$ ; $F_t = F_{xt} + F_{yt}$ .....	117
(51)	$F_x^M = F_{xp} \cos \alpha_h$ .....	117
(52)	$M(F_t^M) - M(F_x^M) = \Delta\tau_m \Leftrightarrow (F_t^M - F_x^M) l_h/2 - \Delta\tau_m \leq 0$ .....	117
(53)	$(F_t^M - F_x^M) l_h/2 - \Delta\tau_m = 0 \leq \gamma_m^{cp} \leq F_t^M - F_x^M = 0$ .....	117
(54)	$\gamma_m^{cp} = 100 \frac{h}{L \cos \varphi}$ .....	117
(55)	$\gamma_{p,i}^{cp} = 100 \frac{\Delta d_{p,i}^R}{L \cos \varphi_{p,i}}$ .....	117
(56)	$\varphi_{p,i} = \sin^{-1} \frac{\Delta d_{p,i}^R - \Delta d_{p,i-1}^R}{L}$ .....	118
(57)	$\tau_m = \frac{Ed^4T}{10,8N_tD}$ .....	118
(58)	$M = \psi EI$ .....	119
(59)	$\psi = \frac{\frac{d^2w}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dz}\right)^2\right]^{3/2}}$ .....	120

$$(60) \quad \psi \approx \frac{d^2 w}{dz^2} \dots\dots\dots 120$$

$$(61) \quad \psi = 1/r = \frac{d\theta}{dz} \dots\dots\dots 120$$

$$(62) \quad \psi \cong \Delta\theta/L = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{L} \dots\dots\dots 120$$

$$(63) \quad L = 2r \sin(\theta/2) \Leftrightarrow r = \frac{L}{2 \sin \alpha}; \quad \alpha = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2} \dots\dots\dots 120$$

$$(64) \quad \psi = 2 \sin\left(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2}\right)/L \dots\dots\dots 120$$

$$(65) \quad \psi = 1/r = \frac{4A_{abc}}{abc}; \quad \begin{cases} a = \sqrt{(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i}^R)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2} \\ b = \sqrt{(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i+1}^R)^2 + (z_{i-1} - z_{i+1})^2} \\ c = \sqrt{(\Delta D_{p,i}^R - \Delta D_{p,i+1}^R)^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \\ A_{abc} = \frac{z_{i-1}(\Delta D_{p,i+1}^R - \Delta D_{p,i}^R) + z_i(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i+1}^R) + z_{i+1}(\Delta D_{p,i}^R - \Delta D_{p,i-1}^R)}{2} \end{cases} \dots\dots\dots 120$$

$$(66) \quad w = f(z) = az^3 + bz^2 + cz + d \dots\dots\dots 121$$

$$(67) \quad \psi \approx \frac{d^2 w}{dz^2} = 6az + 2b \dots\dots\dots 121$$

$$(68) \quad \begin{cases} \tan \theta = \frac{\overline{ac}}{\overline{ad}} = \frac{\overline{oa} \cos \alpha}{L \cos \varphi} = \cos \alpha \tan \varphi \\ \tan \beta = \frac{\overline{ab}}{\overline{ad}} = \frac{\overline{oa} \sin \alpha}{L \cos \varphi} = \sin \alpha \tan \varphi \end{cases}; \quad \cos \varphi = \frac{\overline{ad}}{L} \dots\dots\dots 123$$

$$(69) \quad \tan^2 \theta + \tan^2 \beta = \tan^2 \varphi \dots\dots\dots 123$$

$$(70) \quad \sin \varphi = \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \dots\dots\dots 123$$

$$(71) \quad d^R = L \sin \varphi = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \dots\dots\dots 123$$

$$(72) \quad \tan \beta / \tan \theta = \sin \alpha / \cos \alpha \Leftrightarrow \alpha = \tan^{-1}(\tan \beta / \tan \theta) \dots\dots\dots 123$$

$$(73) \quad \begin{cases} d^A = d^R \cos \alpha \\ d^B = d^R \sin \alpha \end{cases} \dots\dots\dots 123$$

$$(74) \quad \begin{cases} d^A = L \sin \varphi \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \frac{\tan \theta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} = L \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \\ d^B = L \sin \varphi \frac{\tan \beta}{\tan \varphi} = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \frac{\tan \beta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} = L \frac{\tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \end{cases} \dots\dots\dots 123$$

$$(75) \quad d_i = Lm_i \pm \varepsilon_a + \varepsilon_s \dots\dots\dots 131$$

$$(76) \quad D_j = \sum_i^j d_i = L \sum_i^j m_i \pm \sqrt{n} \varepsilon_a + n \varepsilon_s; n = j - i + 1 \dots\dots\dots 131$$

$$(77) \quad \varepsilon_a^B = \pm \frac{t}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_a^A / \sqrt{2})^2 + (u_f / \sqrt{2})^2}; t = 2 \dots\dots\dots 133$$

$$(78) \quad \Delta d_{p,i} = d_{p,i} - d_{r,i} \Rightarrow \Delta d_{p,i} = L \Delta m_i \pm \sqrt{2} \varepsilon_a + 2 \varepsilon_s \dots\dots\dots 133$$

- (79)  $\Delta D_{p,j} = D_{p,j} - D_{r,j} \Rightarrow \Delta D_{p,j} = L \sum_i^j \Delta m_i \pm \sqrt{2n} \varepsilon_a + 2n \varepsilon_s; n = j - i + 1$ .....133
- (80)  $\begin{cases} l_i^0 = k \sin \delta_i^0 + b \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^0_{s,i} \\ l_i^{180} = k \sin \delta_i^{180} + b \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^{180}_{s,i} \end{cases}; \delta = \theta \vee \delta = \beta$ .....135
- (81)  $m_i = \frac{l_i^0 - l_i^{180}}{2k} = \sin \delta_i \pm t \frac{s}{\sqrt{2}} + \varepsilon_{s,i}; t \frac{s}{\sqrt{2}} = \varepsilon_a; \varepsilon_{s,i} = \frac{\varepsilon'^0_{s,i} + \varepsilon'^{180}_{s,i}}{2}; \delta = \theta \vee \delta = \beta$ .....135
- (82)  $\begin{cases} \varepsilon_a = 2 \varepsilon'_a / \sqrt{2} \\ \varepsilon_s = 2 \varepsilon'_s / 2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon'_a = \varepsilon_a / \sqrt{2} \\ \varepsilon'_s = \frac{\varepsilon'^0_s + \varepsilon'^{180}_s}{2} \end{cases}$ .....135
- (83)  $\begin{cases} S_i^A = l_i^{A0} + l_i^{A180} \\ S_i^B = l_i^{B0} + l_i^{B180} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} S_i^A = 2b_A \pm \sqrt{2} \varepsilon'^A_a + \varepsilon'^{A0}_{s,i} + \varepsilon'^{A180}_{s,i} \\ S_i^B = 2b_B \pm \sqrt{2} \varepsilon'^B_a + \varepsilon'^{B0}_{s,i} + \varepsilon'^{B180}_{s,i} \end{cases}$ .....135
- (84)  $\begin{cases} S_i^A = 2b_A \pm \varepsilon^A_a + 2\varepsilon^A_{s,i} \\ S_i^B = 2b_B \pm \varepsilon^B_a + 2\varepsilon^B_{s,i} \end{cases}$ .....136
- (85)  $\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \cong 2b$ .....136
- (86)  $s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \mu)^2}{n-1}}$ .....140
- (87)  $\Delta s = s_p - s_r$ .....143
- (88)  $F = s_1^2 / s_2^2; s_1^2 \geq s_2^2$ .....143
- (89)  $\begin{cases} F_{0,05}(df_1; df_2) \geq s_p^2 / s_r^2 \\ \Delta s = s_p - s_r \end{cases}; s_p \geq s_r \Rightarrow \begin{cases} s_p \leq s_r \sqrt{F_{0,05}(df_1; df_2)} \\ |\Delta s| \leq s_r \left[ \sqrt{F_{0,05}(df_1; df_2)} - 1 \right] \end{cases}$ .....144
- (90)  $\begin{cases} l_{p,i}^0 - l_{r,i}^0 = k \sin \delta_{p,i}^0 + b_p \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^0_{s,p,i} - (k \sin \delta_{r,i}^0 + b_r \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^0_{s,r,i}) \\ l_{p,i}^{180} - l_{r,i}^{180} = k \sin \delta_{p,i}^{180} + b_p \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^{180}_{s,p,i} - (k \sin \delta_{r,i}^{180} + b_r \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'^{180}_{s,r,i}) \end{cases} \Leftrightarrow$   
 $\Leftrightarrow \begin{cases} \Delta l_i^0 = \Delta d_i^0 + \Delta b \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'^0_{s,p,i} \\ \Delta l_i^{180} = \Delta d_i^{180} + \Delta b \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'^{180}_{s,p,i} \end{cases}; \Delta l_i = l_{p,i} - l_{r,i}; \Delta b = b_p - b_r; \varepsilon'_{s,r,i} = 0$ .....148
- (91)  $\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} = \pm 2 \varepsilon'_a + \varepsilon'^0_{s,p,i} - \varepsilon'^{180}_{s,p,i}$ .....149
- (92)  $\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon'^0_{s,p,i} - \varepsilon'^{180}_{s,p,i}$ .....149
- (93)  $\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon'^0_{s,p,i} + \varepsilon'^{180}_{s,p,i}; 2\Delta b = \mu_p - \mu_r$ .....149
- (94)  $\Delta l_i - \Delta b = \pm \varepsilon_a + \varepsilon'_{s,p,i}; \Delta b = \frac{\mu_p - \mu_r}{2}$ .....149
- (95)  $l_{c,p,i} = l_{p,i} - (\bar{S}_i - \mu_p)$ .....150
- (96)  $\bar{\Delta l} = \sum_{i=1}^n (l_{p,i} - l_{r,i}) / n$ .....150
- (97)  $\bar{\Delta l}^0 - \bar{\Delta l}^{180} \cong \varepsilon'^0_{s,p} - \varepsilon'^{180}_{s,p}$ .....150

(98)	$\bar{\Delta}l^0 + \bar{\Delta}l^{180} - 2\Delta b \cong \varepsilon_{s,p}^{'0} + \varepsilon_{s,p}^{'180}$	150
(99)	$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = l_{p,i}^0 - (\bar{\Delta}l^0 - \bar{\Delta}l^{180}) \\ l_{c,p,i}^{180} = l_{p,i}^{180} + (\bar{\Delta}l^0 - \bar{\Delta}l^{180}) \end{cases}$	150
(100)	$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = l_{p,i}^0 - (\bar{\Delta}l^0 + \bar{\Delta}l^{180} - 2\Delta b) \\ l_{c,p,i}^{180} = l_{p,i}^{180} - (\bar{\Delta}l^0 + \bar{\Delta}l^{180} - 2\Delta b) \end{cases}$	150
(101)	$\begin{cases} \vartheta_A = \sin^{-1} \frac{\Delta D^A}{D^B} \\ \vartheta_B = \sin^{-1} \frac{\Delta D^B}{D^A} \end{cases}$	152
(102)	$\begin{cases} x = x' \cos \vartheta - y' \sin \vartheta \\ y = x' \sin \vartheta + y' \cos \vartheta \end{cases}$	153
(103)	$\begin{cases} x = x' - y' \sin \vartheta \\ y = x' \sin \vartheta + y' \end{cases}$	153
(104)	$\begin{cases} \vartheta_A = -\vartheta' \\ \vartheta_B = \vartheta' \end{cases}$	154
(105)	$\begin{cases} d_{c,i}^A = d_i^A - d_i^B \sin \vartheta_A \\ d_{c,i}^B = d_i^B - d_i^A \sin \vartheta_B \end{cases} \vee \begin{cases} D_{c,i}^A = D_i^A - D_i^B \sin \vartheta_A \\ D_{c,i}^B = D_i^B - D_i^A \sin \vartheta_B \end{cases}$	154
(106)	$\begin{cases} d_i^A - d_{c,i}^A = d_i^B \sin \vartheta_A = \varepsilon_{s,i}^A \\ d_i^B - d_{c,i}^B = d_i^A \sin \vartheta_B = \varepsilon_{s,i}^B \end{cases} \vee \begin{cases} D_i^A - D_{c,i}^A = D_i^B \sin \vartheta_A = \sum_i \varepsilon_{s,i}^A \\ D_i^B - D_{c,i}^B = D_i^A \sin \vartheta_B = \sum_i \varepsilon_{s,i}^B \end{cases}$	155
(107)	$C_i = \frac{d_{i+1} - d_i}{L}$	158
(108)	$d_{c,i} = d_i \pm C_i \varepsilon_P$	158
(109)	$C_i \varepsilon_P = \pm \frac{d_{i+1} - d_i}{L} \varepsilon_P = \pm \frac{L \sin(\delta_{i+1} - \delta_i)}{L} \varepsilon_P = \pm \varepsilon_P \sin \Delta \delta_i ; \delta = \theta \vee \delta = \beta$	158
(110)	$\bar{d}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta D_i / D_i)}{n}$	159
(111)	$\Delta D_{c,i} = \Delta D_i - \bar{d}_s D_i$	159
(112)	$l_{c,i} = l_i (1 - \bar{d}_s)$	159
(113)	$K \sin \delta = l(1 - \bar{d}_s) \Leftrightarrow \frac{K}{(1 - \bar{d}_s)} \sin \delta = l = K_c \sin \delta ; \sin \delta = l$	160
(114)	$S_i = mP_i + b$	163
(115)	$S_{c,i} = S_i - m(P_i - P_0); P_0 = P_1 - L$	163
(116)	$\begin{cases} l_{c,i}^0 = l_i^0 - m(P_i - P_0)/2 \\ l_{c,i}^{180} = l_i^{180} - m(P_i - P_0)/2 \end{cases}; P_0 = P_1 - L$	163
(117)	$(l_i^0 + x_i) + (l_i^{180} + x_i) \cong \mu \Leftrightarrow x_i \cong (\mu - S_i)/2$	165

$$(118) \quad |\varepsilon_{s,i}| \cong |S_i - \mu|/2 \dots\dots\dots 166$$

$$(119) \quad \begin{cases} l_{i+1}^0 - l_i^0 = \Delta l_i^0 \pm \sqrt{2}\varepsilon'_a + 2\varepsilon'_{s,i} \\ l_{i+1}^{180} - l_i^{180} = \Delta l_i^{180} \pm \sqrt{2}\varepsilon'_a + 2\varepsilon'^{180}_{s,i} \end{cases} \dots\dots\dots 167$$

$$(120) \quad \Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}}\varepsilon_a + 2(\varepsilon'^0_{s,i} + \varepsilon'^{180}_{s,i}) \dots\dots\dots 167$$

$$(121) \quad \mu_p \cong l_{p,i}^0 + l_{p,i}^{180} \Rightarrow \begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases} \dots\dots\dots 167$$

$$(122) \quad \begin{cases} \mu \cong l^0 + l^{180} \\ \Delta\mu \cong \Delta l^0 + \Delta l^{180} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} l^0 + l^{180} - \mu \cong 0 \\ \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \cong 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} l^0 \cong \mu - l^{180} \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 \\ l^0 + l^{180} - \mu \cong \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} l^0 \cong \mu - l^{180} \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 \\ l^0 \cong \mu - l^{180} + \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 + \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \end{cases} \dots\dots\dots 170$$

$$(123) \quad l_{c,i}^0 = l_i^0 - (\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}) = l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} \Rightarrow d_{c,i} = L \frac{l_{c,i}^0 - l_i^{180}}{2k} = L \frac{l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - l_i^{180}}{2k} \dots\dots\dots 171$$

$$(124) \quad \begin{cases} l_{c,i}^0 = l_i^0 - (\Delta l_i^0 - \Delta b) = l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta b \\ l_{c,i}^{180} = l_i^{180} - (\Delta l_i^{180} - \Delta b) = l_i^{180} - \Delta l_i^{180} + \Delta b \end{cases} \Rightarrow d_{c,i} = L \frac{l_{c,i}^0 - l_{c,i}^{180}}{2k} = L \frac{l_i^0 - \Delta l_i^0 - l_i^{180} + \Delta l_i^{180} + \Delta b}{2k} \dots\dots\dots 171$$

$$(125) \quad \bar{s} = \sqrt{\frac{\sum s_i^2}{m}} \dots\dots\dots 172$$

$$(126) \quad S_{c,i} = l_{c,i} + l_i \Rightarrow \varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_{c,i}) + \varepsilon^2(l_i)} \dots\dots\dots 174$$

$$(127) \quad l_{c,i} = l_i \pm (\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}) \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta l_i)} = \sqrt{\frac{5}{2}}\varepsilon_a \dots\dots\dots 175$$

$$(128) \quad \varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{5}{2}}\varepsilon_a\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{3}\varepsilon_a \dots\dots\dots 175$$

$$(129) \quad l_{c,i} = \mu - l_i \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(\mu) + \varepsilon^2(l_i)} = \sqrt{s^2 + \frac{\varepsilon_a^2}{2}} \dots\dots\dots 175$$

$$(130) \quad \varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{s^2 + \frac{\varepsilon_a^2}{2}}\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{s^2 + \varepsilon_a^2} \cong \sqrt{2}\varepsilon_a; s \cong \varepsilon_a \dots\dots\dots 175$$

$$(131) \quad l_{c,i} = l_i - (\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b) \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta b)} \Leftrightarrow \Leftrightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\frac{5}{2}\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2} \dots\dots\dots 175$$

$$(132) \quad \varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{5}{2}\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2}\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{3\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2} \cong \sqrt{5}\varepsilon_a; \{s_p; s_r\} \cong \varepsilon_a \dots\dots\dots 175$$





## ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO I: OUTROS PARÂMETROS A CONSIDERAR NA SELEÇÃO DE UMA MESA ROTATIVA PARA EFEITOS DE CALIBRAÇÃO INCLINOMÉTRICA (Coimbra, 2011).....	221
ANEXO II: EXTRAÇÃO DE VALORES DE ERRO TÍPICO A PARTIR DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS.....	225
ANEXO III: ENSAIOS INCLINOMÉTRICOS LABORATORIAIS: DIVERGÊNCIAS ENTRE INSTRUMENTOS E ESTABILIDADE DAS LEITURAS EM FUNÇÃO DA MAGNITUDE DA INCLINAÇÃO .....	229
ANEXO IV: DETERMINAÇÃO DA CONSTANCE INSTRUMENTAL DE SISTEMAS INCLINOMÉTRICOS ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS COMPARATIVOS .....	247
ANEXO V: DISTORÇÃO MÁXIMA DE TUBOS INCLINOMÉTRICOS EM CONDIÇÕES DE “CORTE PLENO”. CASO DE OBRA DEMONSTRATIVO, VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONCEITO E ELEMENTOS DE CÁLCULO ADICIONAIS .....	257
ANEXO VI: CORREÇÃO DE ERROS DE ALTERAÇÃO DO DESVIO NA ORIGEM. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	265
ANEXO VII: CORREÇÃO DE ERROS DE ROTAÇÃO. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	283
ANEXO VIII: CORREÇÃO DE ERROS DE PROFUNDIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	291
ANEXO IX: CORREÇÃO DE ERROS DE SENSIBILIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	299
ANEXO X: DERIVA SISTEMÁTICA DO DESVIO NA ORIGEM EM PROFUNDIDADE DEVIDO AO INGRESSO DE ÁGUA NA SONDA INCLINOMÉTRICA .....	305
ANEXO XI: CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS PONTUAIS. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASOS DE OBRA .....	319
ANEXO XII: ESTIMATIVA DO ERRO EM CURVAS DE PERFIL .....	331



## SIMBOLOGIA E NOTAÇÃO

### Lista de índices

$0, 180$	Sentidos $0^\circ$ e $180^\circ$ , respectivamente (sobrescrito).
$A, B$	Direções $A$ e $B$ , respectivamente.
$A0, A180$	Sentidos $0^\circ$ e $180^\circ$ da direção $A$ , respectivamente (sobrescrito).
$B0, B180$	Sentidos $0^\circ$ e $180^\circ$ da direção $B$ , respectivamente (sobrescrito).
$i, j$	Indicador sequencial de secção de tubo, profundidade/cota ou leitura.
$n$	Índice máximo ou quantidade total (especificado no texto).
$p, r$	Indicador sequencial de campanha e de referência, respectivamente.
$R$	Resultante dos deslocamentos (sobrescrito).

### Lista de variáveis

$A_{abc}$	Área do triângulo $abc$ .
$a, b, c, d$	Constantes duma função ou arestas poligonais ((65), (66), (67), (68), (114)).
$A, B, Z$	Escalares das componentes de $\vec{I}$ nas direções $A, B$ e vertical, respectivamente.
$b$	Desvio na origem.
$C$	Curvatura dum troço de tubo.
$C_u$	Resistência ao corte não drenada.
$D$	Diâmetro médio da bobine duma mola de torção ((57)); desvio acumulado (restantes expressões).
$d$	Deslocamento no topo de um provete num ensaio de corte simples ((27)); diâmetro do fio duma mola de torção ((57)); desvio incremental (restantes expressões).
$D_c$	Desvio acumulado corrigido.
$d_c$	Desvio incremental corrigido.
$D_e$	Diâmetro exterior do tubo inclinométrico.
$D_f$	Diâmetro do furo de sondagem.
$df$	Graus de liberdade duma distribuição de valores.
$\bar{d}_s$	Coefficiente de deriva da sensibilidade.
$E$	Módulo de elasticidade.
$F$	Razão entre variâncias ( $F$ -Fisher, (88), (89)); força ou peso (restantes expressões).
$f_c$	Resistência à compressão não confinada.
$FSL$	Fator de segurança local.
$F_t$	Força tangencial no ponto de encontro com o obstáculo $h$ .

$F_t^M$	Componente de $F_t$ que atua no plano transversal ao da haste de suporte das rodas.
$F_x$	Metade da componente de $F$ transversal à haste de suporte das rodas.
$F_x^M$	Componente de $F_x$ que atua no plano transversal ao da haste de suporte das rodas.
$F_{xn}, F_{xt}$	Componentes normal e tangencial de $F_x$ no ponto de encontro com o obstáculo $h$ .
$F_{xq}, F_{xp}$	Componentes normal e tangencial de $F_x$ no extremo oposto ao do obstáculo $h$ .
$F_y$	Componente de $F$ longitudinal à haste de suporte das rodas.
$F_{yn}, F_{yt}$	Componentes normal e tangencial de $F_y$ no ponto de encontro com o obstáculo $h$ .
$g$	Aceleração gravítica.
$G_i$	Módulo de corte inicial.
$h$	Altura dum provete num ensaio de corte simples ((27)); dimensão dum obstáculo a transpor (restantes expressões).
$I$	Impulsão gerada pela calda de encastramento do tubo ((1)); momento de inércia dum elemento sob flexão ((58)).
$\vec{I}$	Vetor representativo dum troço de tubo.
$K$	Constante instrumental ((113)).
$k$	Coeficiente de majoração do volume de injeção ou de preenchimento ((4)); índice ou número total das campanhas de referência de um histórico ((78), (79)); constante instrumental (restantes expressões).
$L$	Passo de leitura (in ex.: bitola do instrumento).
$l$	Comprimento da alonga utilizada ((25)); leitura inclinométrica (restantes expressões).
$l_c$	Leitura inclinométrica corrigida.
$l_e$	Comprimento do maciço de encastramento.
$l_h$	Comprimento da haste que suporta as rodas inclinométricas.
$L_s$	Comprimento total da sonda inclinométrica.
$l_t$	Comprimento entre rodas no plano da haste que as suporta.
$M$	Momento.
$m$	Altura correspondente ao uso de roldana e mordentes ((25)); número de campanhas ((125)); declive ou taxa de variação (sem índice); medição (com índice).
$n$	Índice máximo ou quantidade total (especificado no texto).
$N_t$	Número de voltas da bobine duma mola de torção.
$P$	Profundidade ou cota.
$P_t$	Profundidade de medição de topo (última medição efetuada em campo).
$P_t^{corr}$	Profundidade de medição de topo corrigida.
$r$	Raio (especificado no texto).
$R_f$	Coeficiente de rotura.

$S$	Nível de tensão ( <i>stress level</i> , (32), (33)); soma de leituras (restantes expressões).
$s$	Desvio padrão das somas das leituras.
$\bar{S}$	Média parcial das somas de leituras.
$\bar{s}$	Desvio padrão empolado.
$S_c$	Soma de leituras corrigida.
$T$	Rotação relativa dos braços duma mola de torção ((57)); tolerância, entendida como o dobro da exatidão (restantes expressões).
$t$	Valor crítico da distribuição <i>t-Student</i> .
$TUR$	Coeficiente de incerteza do ensaio ( <i>test uncertainty ratio</i> ).
$U$	Incerteza expandida.
$u$	Incerteza individual não expandida.
$u_c$	Incerteza combinada não expandida.
$u_f$	Folga lateral entre as rodas inclinométricas e as paredes das calhas de rodagem.
$V$	Volume de injeção ou de preenchimento necessário.
$w$	Deslocamento lateral.
$x, y$	Variável ou quantidade a determinar (especificado no texto).
$x', y'$	Variável ou quantidade conhecida (especificado no texto).
$z$	Distância, cota ou comprimento de arco (especificado no texto).
$\alpha$	Orientação da resultante dos deslocamentos.
$\alpha_h$	Ângulo entre a haste que suporta as rodas e o plano transversal ao tubo.
$\alpha_r$	Ângulo entre o plano transversal ao tubo e o segmento de reta desde o ponto de encontro com $h$ até ao eixo de rotação da roda.
$\beta$	Ângulo de inclinação na direção $B$ .
$\gamma$	Distorção total.
$\gamma^{cp}$	Distorção em condição de “corte pleno”.
$\gamma_m^{cp}$	Distorção máxima em condição de “corte pleno”.
$\gamma_h, \gamma^h$	Distorção horizontal no terreno.
$\gamma^t$	Distorção do tubo.
$\gamma_{tm}$	Distorção máxima do tubo inclinométrico.
$\Delta$	Deslocamento.
$\Delta b$	Diferencial entre desvios na origem.
$\Delta D$	Deslocamento acumulado.
$\Delta d$	Deslocamento incremental.
$\Delta l$	Diferencial entre leituras.
$\bar{\Delta l}$	Média dos diferenciais entre leituras.

$\Delta m$	Diferencial entre medições.
$\Delta s$	Diferencial de dispersão entre uma campanha ordinária e a referência respetiva.
$\Delta_t$	Diferença entre as cotas do topo do tubo e do terreno.
$\Delta\delta$	Variação angular ao longo dum troço de tubo.
$\Delta\theta$	Variação angular.
$\Delta\mu$	Diferencial entre médias de somas de leituras.
$\Delta\tau_m$	Diferencial de torque.
$\delta$	Ângulo de inclinação do tubo.
$\varepsilon$	Erro.
$\varepsilon_a$	Erro aleatório duma medição.
$\varepsilon'_a$	Erro aleatório duma leitura.
$\varepsilon_P$	Erro de profundidade.
$\varepsilon_s$	Erro sistemático duma medição.
$\varepsilon'_s$	Erro sistemático duma leitura.
$\theta$	Ângulo genérico (especificado no texto); ângulo de inclinação na direção <i>A</i> (se não especificado).
$\theta_{dis}$	Ângulo máximo de inclinação do tubo em situação de deformação distribuída.
$\theta_{loc}$	Ângulo máximo de inclinação do tubo em situação de deformação localizada.
$\vartheta$	Diferencial angular entre as inclinações de dois troços de tubo contíguos ((44), (45)); ângulo de rotação dum ponto num determinado referencial (restantes expressões).
$\vartheta'$	Ângulo de rotação dum referencial.
$\mu$	Média aritmética genérica ((85)); Média das somas das leituras (restantes expressões)
$\rho_c$	Massa volúmica da calda de injeção.
$\tau$	Tensão de corte.
$\tau_i$	Tensão de corte inicial.
$\tau_m$	Torque duma mola de torção.
$\tau_{rot}$	Tensão de corte na rotura.
$\tau_{ult}$	Tensão de corte última.
$\varnothing$	Diâmetro ou calibre.
$\varphi$	Inclinação dum troço de tubo.
$\varnothing_c$	Largura interna do tubo na zona das calhas de rodagem.
$\varnothing_s$	Diâmetro externo da sonda inclinométrica.
$\varnothing_t$	Diâmetro interno do tubo.
$\psi$	Curvatura dum elemento sob flexão.
$\omega$	Ângulo entre a tangente duma superfície de deslizamento e o plano transversal ao tubo na zona de interseção.

## GLOSSÁRIO DE TERMOS

### A

Alonga: troço de tubo inclinométrico com uma união acoplada, destinado a facilitar a execução de campanhas de observação com recurso a roldana e mordentes, em instalações inclinométricas cujo topo se encontra demasiado baixo (in ex.: junto ou abaixo da cota superficial do terreno).

### C

Constante instrumental: contante de proporcionalidade entre os valores de leitura e os valores da correspondente da grandeza física a medir. A constante instrumental relaciona-se diretamente com a **Resolução** e com o **Ganho**.

### D

Deriva do desvio na origem: variação do desvio na origem, lenta e tendencial ao longo da vida útil do instrumento, ou brusca e imprevisível com carácter temporário ou permanente.

Deslocamento acumulado: integral dos **Deslocamentos** incrementais ao longo dum perfil.

Deslocamento incremental: diferencial entre duas **Leituras** ou **Medições** da mesma secção de tubo em duas datas distintas.

Desvio acumulado: integral dos **Desvios** incrementais ao longo dum perfil.

Desvio incremental: segmento de reta entre o **Plano** de referência dum **Inclinómetro** e uma das extremidades dum troço de tubo, no plano transversal ao primeiro (in ex.: cateto oposto ao ângulo formado pelo pela haste do instrumento e o **Plano** de referência respetivo).

Desvio na origem: valor medido quando a grandeza observada tem valor nulo.

### E

Exatidão: diferença entre o valor da grandeza observada e o valor medido correspondente.

### G

Ganho: relação entre a variação da grandeza a observar e a variação correspondente da resposta sensorial do respetivo instrumento de medição. Quanto maior for a resposta sensorial, face a uma determinada variação da grandeza observada, maior é o ganho do instrumento. Dependendo do meio profissional, os termos **Ganho** e **Sensibilidade** podem confundir-se (ver **Sensibilidade**).

### H

Histerese: retenção de determinada propriedade na ausência do estímulo que a gerou (in ex.: ma-



terial cujo estado em determinado momento depende do histórico de estados em momentos anteriores). No âmbito instrumental/sensorial, esta característica é indesejável e pode-se manifestar por *a)* um atraso na resposta à variação da grandeza observada, ou pela *b)* diferença entre as curvas de resposta ascendente e descendente da variação linear da grandeza observada dentro de determinada amplitude. *b)* tem consequências mais difíceis de contornar, uma vez que implica deriva do desvio e instabilidade de linearidade em função do histórico de medição.

## I

Inclinómetro: dispositivo que mede inclinações. No âmbito deste trabalho, compreende um instrumento com uma haste rígida de comprimento pré-definido e mede inclinações relativamente a um Plano de referência, podendo este ser vertical, horizontal ou oblíquo.

## L

Leitura (inclinométrica): registo inclinométrico individual.

Linearidade: máximo desvio entre a curva de resposta de um sensor, dentro de determinada amplitude, e a respetiva regressão linear centrada na origem.

Linearização: ajuste de uma função linear a outra polinomial, ou a um conjunto de valores conhecidos, normalmente por regressão numérica. No âmbito da instrumentação, a linearização faz-se dentro da amplitude de medição cujo valor máximo de divergência entre as funções de resposta e de linearização é igual ou inferior a um determinado erro (ver Linearidade).

## M

Medição (inclinométrica): média da diferença entre duas leituras simétricas.

## P

Passo de leitura: espaçamento entre leituras consecutivas numa determinada campanha de observação. No âmbito dos dispositivos inclinométricos, este espaçamento coincide com o comprimento padrão da haste rígida do instrumento.

Percentil: valor abaixo do qual se concentra a percentagem correspondente do volume total de dados. Por exemplo, um percentil  $P_{0,1} = x$  indica que 10% dos valores do conjunto de dados são inferiores a  $x$ . Um percentil incluso indica que o valor do percentil se inclui naquela percentagem do volume de dados, enquanto um percentil exclusivo exclui o valor do percentil. Por defeito, os percentis são normalmente exclusivos.

Plano de referência: condição/estado em que o sensor gera uma resposta (in ex.: medição) nula. No caso particular dos sensores inclinométricos, traduz-se num plano de inclinação relativamente

ao plano da aceleração gravítica, geralmente um plano horizontal ou vertical.

## **R**

Resolução: menor valor de leitura/medição que é possível observar. Em sistemas digitais a resolução é normalmente de uma unidade, em sistemas analógicos este valor depende da escala de graduação.

## **S**

Sensibilidade: menor variação da grandeza observada que é possível medir. Dependendo do meio profissional, a sensibilidade pode tomar a mesma definição de **Ganho**. Por exemplo, um amplificador operacional aplica um determinado ganho a um sinal de entrada, sendo sensível a uma determinada gama de valores. A alteração da sensibilidade do amplificador resulta na aplicação do ganho definido a uma gama diferente de valores de entrada, sendo esta alteração corrigida através do ajuste do ganho do amplificador. Por esta razão, os termos **Sensibilidade** e **Ganho** são muitas vezes confundidos no léxico associado à eletrotecnia.



## INTRODUÇÃO

Os inclinómetros são instrumentos fundamentais para o estudo e a avaliação da estabilidade de obras geotécnicas. Fornecem elementos para a localização e a compreensão dos mecanismos de rotura eventualmente presentes, contribuindo, dessa forma, para o diagnóstico e o prognóstico da segurança da obra geotécnica e de estruturas adjacentes.

Embora o seu princípio de funcionamento e configuração básica não se tenham alterado nas últimas décadas, os desenvolvimentos ocorridos nos sistemas informáticos permitem, hoje, uma operacionalidade muito facilitada dos inclinómetros. No entanto, muitas medições inclinométricas não atingem os seus objetivos por falta de conhecimento das diversas medidas que é necessário implementar, durante as fases de instalação dos tubos-calha, da leitura dos dados e do respetivo processamento, a fim de minimizar as fontes de erro e de eliminar a ambiguidade ou incoerência dos resultados (Dunnicliff, 1988). Mikkelsen (2003) refere que a simplicidade crescente das operações incentivou o recurso a “subprofissionais” para execução das leituras, processamento dos dados e apresentação de resultados, sem que haja o entendimento necessário à análise crítica sobre os fatores que influenciam as medições e quais as repercussões que têm nos resultados. O mesmo autor afirma que a inclusão de erros sistemáticos nos resultados, sem que sejam devidamente identificados e corrigidos, quando possível, foi potenciada pela progressiva separação entre as equipas que executam os trabalhos de campo e as que fazem o trabalho de análise interpretativa; pois objetiva-se principalmente, ou apenas, as funcionalidades básicas para a produção de resultados sob a forma gráfica. Mesmo quando se utilizam programas comerciais capazes de fornecer indicadores sobre a qualidade dos dados e de corrigir os erros mais comuns, raramente se dá a devida atenção a estas ferramentas no trabalho quotidiano.

Ralph B. Peck<sup>1</sup>, no preâmbulo da obra de Dunnicliff (1988), salienta, para quem exerce na área da geotecnia, que não basta ter um conhecimento casual da instrumentação utilizada; pois, em geotecnia não existe o mesmo controlo nem o mesmo conhecimento sobre as propriedades dos materiais que se verifica noutras disciplinas. Este facto transforma a instrumentação numa ferramenta de trabalho efetivo, muito além de um mero componente da investigação. O mesmo texto cita que a instrumentação é apenas uma parte das atividades relacionadas com a observação geotécnica e que o pessoal especializado, utilizando o melhor dos instrumentos (o olho humano), pode,

---

<sup>1</sup> Ralph B. Peck (1912-2008): Doutoramento em Engenharia Civil, ramo de estruturas (1937). Especializou-se em mecânica dos solos em 1939. Fundador do Método Observacional (Peck, 1969). Presidente da International Society for Soil Mechanics and Foundation Engineering (ISSMGE) entre 1969 e 1973. Autor de mais de 200 publicações e coautor de dois livros dedicados às disciplinas de Fundações (Peck et al., 1974) e de Mecânica dos Solos (Terzaghi et al., 1996). Premiado e galardoado múltiplas vezes no âmbito da ciência, engenharia e serviço civil (GEOENGINEER, 2017).

geralmente, fornecer toda a informação necessária para avaliar a situação. Contudo, a instrumentação permite detetar e acompanhar fenomenologias a uma escala muito inferior à visual e em locais inacessíveis, como é o caso das deformações no subsolo obtidas a partir das medições inclinométricas.

Dunnicliff (1988) define as características essenciais dos técnicos envolvidos na instrumentação como sendo confiáveis e pacientes, perseverantes, conhecedores dos fundamentos básicos da geotecnia, com capacidades no âmbito da mecânica e da eletricidade, atentos ao detalhe e altamente motivados. É claro que esta descrição é generalizada e depende das responsabilidades atribuídas a cada técnico. Dependendo da função a desempenhar, poderão ser mais importantes os conhecimentos de estatística e informática do que os de geotecnia, mecânica, eletricidade ou eletrónica. Contudo, não deixa de ser verdade que a instrumentação geotécnica, independentemente da fase de trabalho em que se intervenha (in ex.: planeamento, instalação, medição, análise e processamento de dados, ou interpretação de resultados), requer fiabilidade, paciência, perseverança, atenção e motivação para que tenha sucesso. Particularmente, é importante que quem recolha e/ou trate os dados conheça minimamente os instrumentos e as particularidades das instalações no terreno, para que possa evitar, minimizar ou reconhecer e, se possível, corrigir a transferência de erros dos dados para os resultados.

A facilidade de operação dos dispositivos de observação e de obtenção dos respetivos resultados, acrescida do facto de muitos fabricantes fornecerem informação escassa sobre os seus produtos, sendo esta uma prática tendencialmente crescente por razões de competitividade, justifica o seu estudo, não apenas do ponto de vista da engenharia geotécnica, mas também do ponto de vista instrumental e metrológico, particularmente no que respeita à análise e ao tratamento da informação recolhida. Pois, a definição de metodologias de análise e a incorporação das respetivas ferramentas nos programas de cálculo permitirá assegurar a confiança nos resultados, evitar a redundância de serviços, observar o correto funcionamento dos instrumentos e estimar o grau de incerteza associada aos resultados. Esta prática é particularmente relevante no caso dos inclinómetros, uma vez que os resultados se obtêm por integração de séries de leituras, geralmente na ordem das dezenas, tornando a replicação e a acumulação de cada erro num problema difícil de contornar e frequentemente inaceitável.

## OBJETIVOS

Pretende-se fazer um levantamento do estado da arte relativamente à operação dos inclinómetros nos trabalhos geotécnicos, desde o princípio de funcionamento e constituição dos instrumentos, passando pelas particularidades associadas à instalação dos respetivos tubos-calha, até à análise dos dados recolhidos e ao seu processamento para efeitos de interpretação de resultados.

Relativamente à análise de dados, demonstra-se, num primeiro plano, quais são os fatores que afetam as leituras, de que forma o fazem e que implicações poderão ter na interpretação dos resultados. Num segundo plano, são fornecidas metodologias que permitem avaliar a qualidade das leituras e proceder à identificação e correção de erros sistemáticos. Acredita-se que a automatização destes procedimentos, incorporando-os nos programas de processamento, e a implementação destas metodologias de verificação na rotina de trabalho produzirão melhores resultados, reduzindo a ambiguidade interpretativa e a redundância das campanhas de observação que muitas vezes são necessários para confirmar ou refutar as dúvidas existentes.

São ainda apresentadas metodologias de processamento que permitem maior flexibilidade relativamente à dinâmica associada a alterações das condições no terreno, como também à transmutação de instrumentos no decorrer da vida útil das instalações inclinométricas, discutindo-se também a produção e análise de resultados complementares aos normalmente fornecidos pelos programas comerciais com o objetivo de inferir parâmetros geotécnicos relevantes para estimativas do fator de segurança de obras geotécnicas. Pois, o potencial de aplicação da informação fornecida pelos inclinómetros é ainda provavelmente desconhecido e, seja por desconhecimento ou pela ausência de ferramentas de cálculo acessíveis, raramente se aplica todo o conhecimento existente.

Finalmente procede-se a uma avaliação funcional do programa de processamento de dados inclinométricos atualmente utilizado pelo Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), com o objetivo de constituir um plano de desenvolvimento futuro que integre os procedimentos de análise e de melhoria qualitativa fundamentados neste documento.



## 1. O INCLINÓMETRO COMO INSTRUMENTO DE OBSERVAÇÃO GEOTÉCNICA

### 1.1. Princípio de funcionamento

Será conveniente começar por diferenciar clinômetros de inclinômetros. Embora não haja diferença do ponto de vista da física e da metrologia, no domínio da geotecnia os primeiros utilizam-se para observar rotações em estruturas e os segundos para localizar e acompanhar as deformações internas de maciços naturais, aterros ou fundações. Ambos os instrumentos medem a sua inclinação num determinado ponto relativamente à posição de referência do sensor (in ex.: posição de inclinação nula, normalmente no plano horizontal ou vertical). Mas, enquanto as medições clinométricas são valores discretos e pontuais, as medições inclinométricas estão associadas a um comprimento de sonda, ou passo de leitura, e utilizam-se para a construção de um perfil contínuo ao longo de um eixo.

A Figura 1 ilustra o princípio básico da inclinometria<sup>1</sup>, em que o seno da inclinação medida multiplicado pelo passo de leitura exprime um desvio transversal à posição de referência e de magnitude proporcional à medição efetuada. Conhecendo-se as posições do instrumento e executando-se uma série de medições ao longo de um eixo (in ex.: um furo de sondagem), obtém-se um conjunto de distâncias perpendiculares à inclinação de referência do sensor, que depois de sucessivamente somadas refletem o perfil desse eixo. As deformações obtêm-se por comparação de perfis obtidos em diferentes datas, permitindo acompanhar a sua evolução ao longo do tempo.

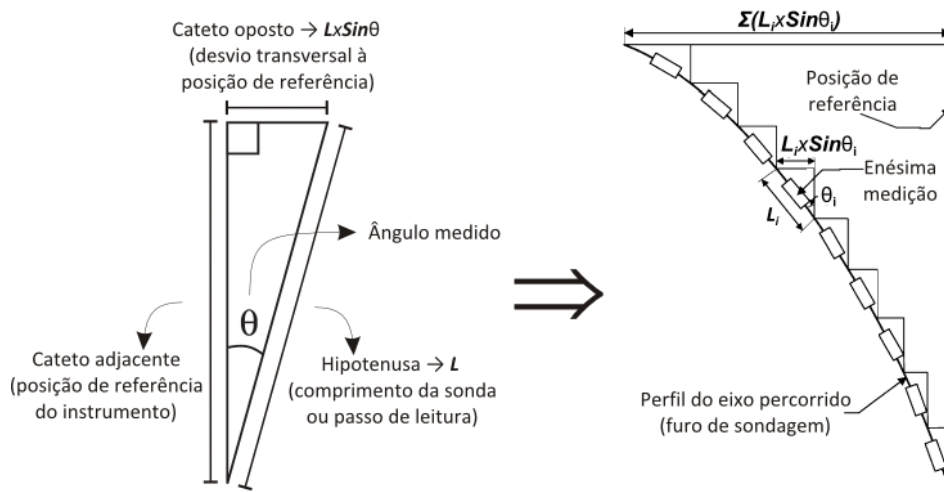


Figura 1 – Princípio básico da inclinometria para levantamento de perfis em furos de sondagem (adaptado de SINCO, 2001; Stark & Choi, 2008).

<sup>1</sup> Traduzido literalmente do termo inglês *inclinometry*: ato de determinar o perfil de um furo através de medições de inclinação e azimute no seu interior (Bronzov et al., 1965).



## 1.2. Enquadramento histórico

A origem da inclinometria está na segunda metade do século XIX, a par do desenvolvimento das indústrias petrolífera e mineira, com o objetivo de medir a magnitude e o sentido dos desvios da perfuração (Tweedie, 2010). Haddock (1931) relata um número impressionante de invenções instrumentais que estão na base dos princípios de funcionamento que ainda hoje governam grande parte da instrumentação, seja para levantamento de perfis após a perfuração de uma sondagem ou para acompanhamento do percurso de um furo durante a sua execução. A primeira técnica retratada consiste numa garrafa com meia altura de ácido fluorídrico, diluído em água, descida até à profundidade pretendida e estacionada durante o período suficiente para que a linha superficial do fluido fique marcada na garrafa (Figura 2a). Esta técnica deu origem ao primeiro instrumento inclinométrico de que se encontrou registo, desenvolvido por G. Nolten (Figura 2b). O método de fluido foi tão importante que originou o primeiro instrumento elétrico, desenvolvido por G. C. McFarlane (Figura 2c), que mede a variação da resistência elétrica de fios condutores parcialmente mergulhados em mercúrio, sendo esse valor proporcional à porção imersa que, por sua vez, varia conforme a inclinação do instrumento. O mesmo princípio encontra-se nos modernos acelerómetros de nível eletrolítico (2.2.2.2; 2.2.5.6). Outros métodos da época – *início do século XX* – dignos de referência são o giroscópico, o de prumo e bússola, e o de pêndulo, cujos mecanismos integraram os primeiros aparelhos de registo sequencial e com receção de dados à superfície. Killeen & Elliott (1996) e Killeen et al. (1995) fazem uma revisão da instrumentação utilizada pela indústria mineira até à data, onde descrevem instrumentos fotográficos, giroscópicos e de bloqueio temporizado com mecanismos idênticos aos que Haddock (1931) retrata.

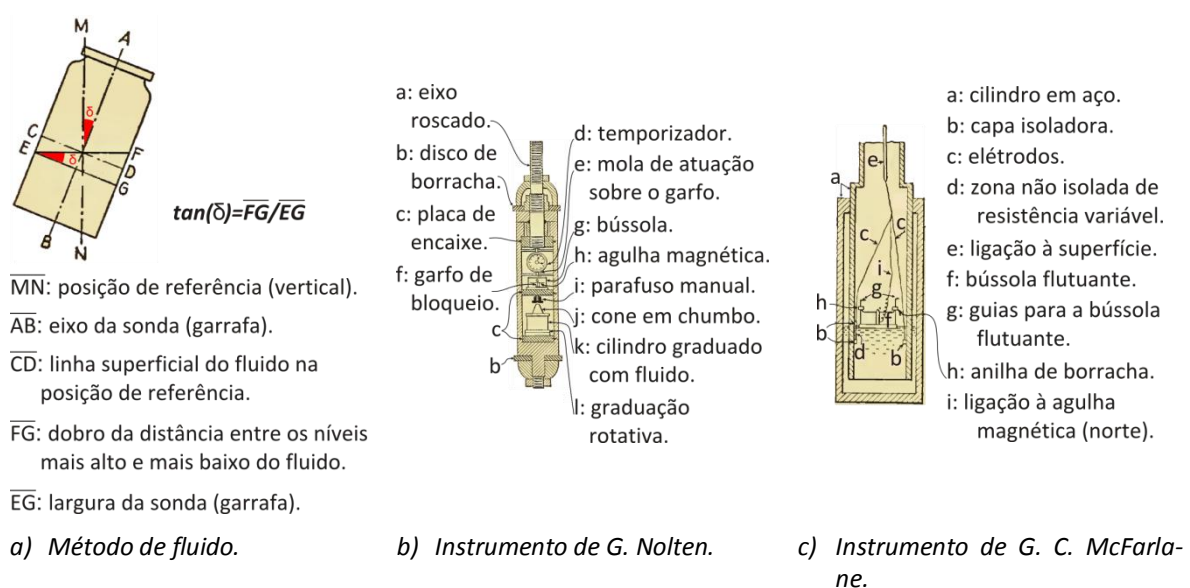


Figura 2 – Exemplos de aplicação das primeiras metodologias para levantamento inclinométrico do perfil de furos de sondagem (adaptado de Haddock, 1931).

A utilização de sistemas inclinométricos para observar deformações internas foi inicialmente sugerida por Evans (1913) para estudar a distribuição das taxas de deslocamento dos glaciares ao longo da sua profundidade. Em 1948, um grupo de investigadores ingleses aplicou o método nos Alpes Suíços com o objetivo de clarificar as duas correntes teóricas sobre a movimentação dos glaciares que na altura se discutiam (Gerrard et al., 1952; Perutz, 1950, 1947, 1940; The Observatory, 1950; Waddington, 2010). Os resultados das medições foram determinantes para o consenso sobre o problema e o sucesso da experiência generalizou a prática inclinométrica para medir as deformações internas dos glaciares (Fisher, 1952; Glen, 1958, 1952; Nye, 1952a, 1952b, 1951). As descrições instrumentais publicadas nesse período variam fundamentalmente entre três tipos distintos de instrumento (Blake & Clarke, 1992; Gerrard et al., 1952; Gow, 1963; Mathews, 1959; Miller, 1958; Sharp, 1953):

- De fluido, com bússola flutuante e elemento pendular, sendo o fluido composto por gelatina aquecida. A solidificação da gelatina conserva as posições dos elementos de medição.
- Instrumentos com bloqueio temporizado, acionando-se um cronómetro que bloqueia os elementos de medição ao fim do tempo determinado. A medição pode fazer-se com prumo e bússola ou pêndulo e giroscópio.
- Instrumentos com registo fotográfico dos elementos de medição, podendo ser de registo sequencial ou singular. Os elementos de medição são idênticos aos dos instrumentos de bloqueio temporizado, mas funcionam com corrente elétrica e possibilitam a leitura do prumo à superfície.

O inclinómetro moderno surgiu na década de 1950 pelo engenho de Stanley DeWolf Wilson<sup>1</sup>, que o terá inventado por sugestão de Karl Terzaghi<sup>2</sup> para colmatar a ausência de um instrumento capaz de medir diretamente as deformações horizontais no interior dos maciços terrosos e rochosos (Peck, 1989). Até então, os movimentos eram essencialmente medidos à superfície, através de pontos de referência, ou observavam-se as deformações ocorridas no interior de poços (Terzaghi, 1961, 1950). Essa necessidade é claramente expressa por Terzaghi (1961, 1950) ao apresentar uma medida preventiva, aplicada pela Comissão Geotécnica Sueca (*Swedish Geotechnical Commission*) entre 1912 e 1922, para evitar acidentes ferroviários causados por deslizamentos de talude em zonas de escavação. A metodologia consiste na instalação de tubos flexíveis encastra-

---

<sup>1</sup> Stanley DeWolf Wilson (1912 – 1985): Formador em Engenharia Civil e Aeronáutica, tanto no âmbito militar como académico. Cofundador das empresas Shannon & Wilson, Inc. e Slope Indicator Company. Inventor, investigador e consultor internacionalmente reconhecido, principalmente na área de fundações e aterros. Autor de mais de 60 publicações técnicas e membro ativo de diversas organizações de engenharia, pelas quais foi repetidamente galardoado pelas suas contribuições (Peck, 1989).

<sup>2</sup> Karl Terzaghi (1883 – 1963): Diplomado em Engenharia Mecânica (1904) e Doutorado em Ciências Técnicas (1912). Professor, engenheiro e consultor internacionalmente reconhecido. Fundador da disciplina de Mecânica dos Solos e cofundador da Geotecnia enquanto ramo especializado da Engenharia Civil. Cofundador e primeiro presidente da Sociedade Internacional de Mecânica dos Solos e Fundações (ISSMFE) durante a década de 1930. Autor e coautor de vários livros no âmbito da Geotecnia (Terzaghi, 1943; Terzaghi et al., 1996). Autor de mais de 200 publicações técnicas e científicas, assim como de inúmeras exposições e correspondências no âmbito da Engenharia Civil (Bjerrum et al., 1960; Goodman, 1999). Premiado por múltiplas vezes pelas contribuições técnicas e científicas no âmbito da Engenharia Civil (ASCE, 2016; Goodman, 2008; Malyshev, 1973).

dos bem abaixo da zona potencial de deslizamento, dentro dos quais se fixa um varão rígido sem que haja contacto entre os dois elementos. O resultado será a deformação do tubo exterior, mantendo-se a posição do varão interior, até que haja contacto entre os dois, fechando-se um circuito elétrico que aciona um dispositivo de alarme. Embora já se utilizassem extensómetros nesse período, estes aplicavam-se maioritariamente em grandes empreendimentos de aproveitamento hidráulico/hidroelétrico.

O primeiro inclinómetro moderno foi disponibilizado no mercado em 1954 (Cornforth, in: BGS, 1974) pela empresa Shannon & Wilson Inc., fundada nesse ano por Stanley D. Wilson e William L. Shannon<sup>1</sup>. Durante o mesmo ano, no contexto da Guerra Fria entre os Estados Unidos e a União Soviética, o exército americano iniciou uma série de atividades na Gronelândia com o objetivo de, numa primeira fase, investigar o comportamento da cobertura gelada e da sua base e, numa fase posterior, construir infraestruturas militares de defesa e retaliação avançadas (1st Engineer Arctic Task Force, 1955; Clark, 1965). Em 1957 a U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES) contratou os serviços da empresa Shannon & Wilson Inc. para obter informações sobre os deslocamentos internos da cobertura gelada na periferia das estradas de acesso construídas em 1956 e 1957. Esta viria a ser a primeira aplicação do inclinómetro no campo, cujo relatório de atividade (WES, 1963) refere como vantajosa e satisfatória. Stanley D. Wilson (WES, 1963 - anexo C) descreve o instrumento utilizado<sup>2</sup> com base no princípio de funcionamento pendular com leitura direta à superfície por intermédio de uma ponte de Wheatstone (1843). A ponta do elemento pendular contacta com uma resistência de alta precisão, formando, efetivamente, duas resistências que compõem meia ponte de Wheatstone; a outra metade encontra-se na unidade de receção. Quando uma aceleração gravítica atua sobre o pêndulo, fazendo deslocar a sua ponta ao longo da resistência, o potencial voltaico da ponte varia proporcionalmente, permitindo deduzir a inclinação a que se encontra o instrumento (Figura 3). Trata-se de um sensor potenciométrico (2.2.2), muito utilizado até à década de 1980.

As seguintes vantagens do *Slope Indicator*, relativamente aos instrumentos antecessores, tornaram o acompanhamento das deformações internas dos maciços, no âmbito da observação geotécnica, exequíveis e apetecíveis, tanto do ponto de vista técnico-prático como do financeiro:

- instalação de um tubo permanente, encastrado bem abaixo da zona potencial de deslizamento, permitindo a medição dos deslocamentos totais relativamente a um ponto fixo;
- orientação azimutal fixa, conseguida através de rodas que deslizam em calhas interiores do

---

<sup>1</sup> Shannon e Wilson foram colegas em Harvard. Decidiram fundar uma empresa de consultoria após o encerramento do programa de Mecânica dos Solos na Universidade de Harvard (Peck, 1989).

<sup>2</sup> *Slope Indicator*: nomenclatura posteriormente aplicada à empresa dedicada ao desenvolvimento de instrumentação geotécnica, de que Wilson foi cofundador.

- tubo instalado, dispensando a necessidade de um sensor giroscópico ou de bússola;
- maior rapidez de execução;
- maior exatidão e precisão, quer pelo tipo de sensor incorporado, quer pela ausência de um sensor azimuthal;
- menor custo e maior durabilidade, pela natureza do sensor e pelos materiais de construção utilizados (in ex.: o primeiro equipamento tinha um corpo de latão).

Contudo, a generalização do uso de inclinómetros só se deu durante das décadas de 1960 e 1970, pelo impacto da sua inclusão no “Método Observacional”, designadamente para observação de deslizamentos e de movimentos internos em obras de aterro (BGS, 1974; Dunnicliff, 1972; Gould & Dunnicliff, 1972; Peck, 1972, 1969; Terzaghi, 1961; Updike, 1983; Updike et al., 1988; Wilson, 1973, 1970; Wilson & Hancock, 1965; Wilson & Mikkelsen, 1978).

Atualmente o inclinómetro é uma parte imprescindível da instrumentação utilizada para observação geotécnica, aplicável no acompanhamento de taludes, encostas, obras de aterro ou de escavação, estruturas de contenção, fundações e obras subterrâneas.

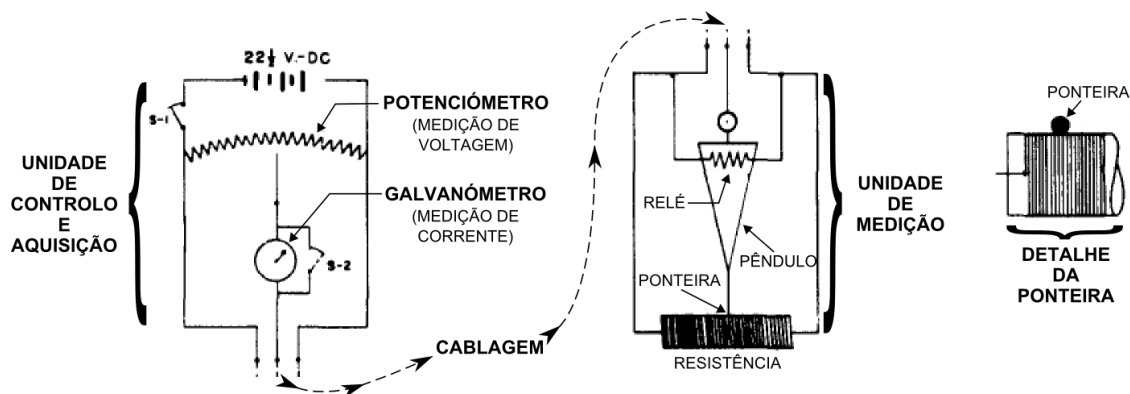


Figura 3 – Diagrama do circuito do primeiro inclinómetro moderno (adaptado de WES, 1963 - anexo C).

### 1.3. Aplicabilidade dos inclinómetros na observação geotécnica

Existem duas grandes categorias de instrumentos de medição para observação geotécnica (Dunnicliff, 1988):

- determinação das propriedades de um determinado maciço;
- observação do desempenho de determinada obra, seja durante a fase de execução, seja durante a sua exploração.

Os inclinómetros enquadram-se na categoria *b*). Pois, utilizam-se para localizar e medir deformações que ocorrem no interior dos maciços, através das quais se avalia e acompanha a respetiva estabilidade no decorrer da execução e/ou exploração de uma obra.

Na Figura 4 esquematiza-se a classificação da instrumentação geotécnica e identifica-se os inclinómetros juntamente com os restantes instrumentos da mesma tipologia. Os inclinómetros en-

quadram-se no grupo das deformações, dentro do qual se classificam como um padrão de deformação transversal (*transverse deformation gage*) por medirem deformações numa direção transversal a uma medida/secção padronizada<sup>1</sup>.

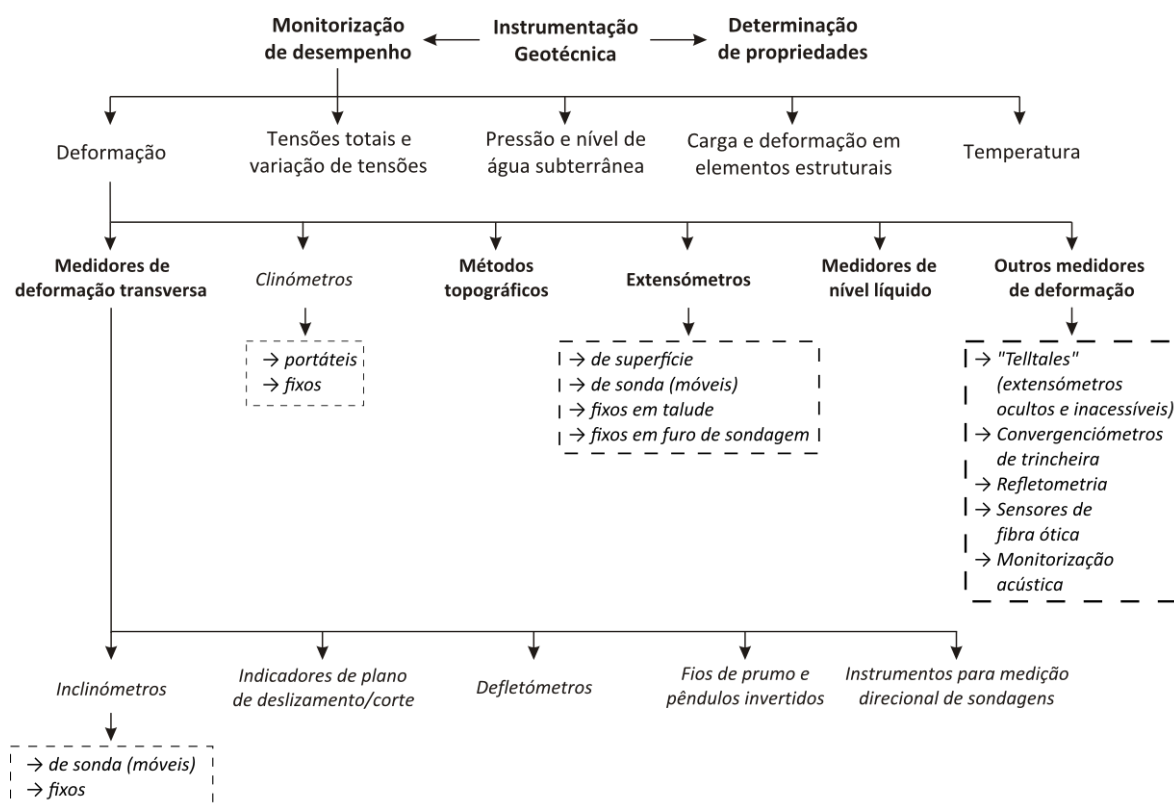


Figura 4 – Enquadramento dos inclinómetros na classificação da instrumentação geotécnica (adaptado de Dunnycliff, 1988).

No Quadro 1 apresenta-se um resumo dos tipos de deformação medidos e das principais aplicações dos diferentes grupos de instrumentos pertencentes à mesma tipologia dos inclinómetros. Neste quadro observa-se que os inclinómetros são adequados ao acompanhamento de qualquer tipo de deformação interna em praticamente qualquer tipo de obra. De um modo geral, os inclinómetros utilizam-se para detetar e acompanhar a evolução de superfícies de deslizamento, designadamente em taludes e encostas, podendo fornecer também um meio de controlo dos níveis de água<sup>2</sup>. Outras aplicações incluem o acompanhamento de:

- assentamentos ao longo de secções transversais de obras de aterro (2.3; 3.7);
- deformações laterais em obras de aterro e de escavação, incluindo as respetivas fundações;
- deformações laterais em estruturas de contenção;
- deformações de fundações profundas (3.3) ou do solo adjacente a outras infraestruturas;
- deformações periféricas em obras subterrâneas, tanto laterais como verticais.

<sup>1</sup> O padrão de medição é o comprimento de sonda ou passo de leitura.

<sup>2</sup> Através dos tubos inclinométricos

Quadro 1 – Instrumentação geotécnica destinada à medição de deformações. Tipos de deformação medidos e principais aplicações (adaptado de Dunnicliff, 1988).

Tipologia / instrumento	*Tipo de deformação medida						Principais aplicações geotécnicas
	H	V	A/O	R	S	I	
Métodos topográficos	X	X	X	-	X	-	<sup>1</sup> Qualquer tipo de obra.
Extensómetros de superfície	X	X	X	-	X	-	<sup>1</sup> Fissuração (elementos estruturais ou maciços naturais); Convergência (obras subterrâneas ou escavações a céu aberto).
Extensómetros de sonda	X	X	X	-	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro e escavações a céu aberto.
Extensómetros fixos em talude	X	X	X	-	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro e escavações a céu aberto.
Extensómetros fixos em furo de sondagem	X	X	X	-	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro, escavações a céu aberto e obras subterrâneas..
Medidores de nível líquido	-	X	-	-	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro e elementos estruturais (assentamentos).
Medidores de deformação transversa	X	X	X	-	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro, escavações, estabilidade de taludes, muros de suporte, fundações, obras subterrâneas, barragens de betão, elementos estruturais.
**Inclinómetros	X	X	X	X	-	X	<sup>1</sup> Obras de aterro, escavações, estabilidade de taludes e encostas, muros de suporte, fundações, obras subterrâneas.
Clinómetros	-	-	-	X	X	X	<sup>1</sup> Muros de suporte, barragens de betão, <sup>2</sup> estabilidade de taludes e de edifícios, subsidência devida à atividade mineira.
*** <i>Telltales</i>	X	X	X	-	X	X	<sup>1</sup> Deformação linear relativa entre dois pontos, em elementos estruturais ou formações naturais.
***Convergenciómetros de trincheira	X	-	-	-	-	X	<sup>1</sup> Escavações em trincheira com instabilidade nos hasteais.
***Refletometria	X	X	X	-	X	X	<sup>1</sup> Degradação gradual do teto em obras subterrâneas; <sup>3</sup> Deformações em estruturas e em maciços naturais.
***Sensores de fibra ótica	X	X	X	-	X	X	<sup>1,4</sup> Estabilidade de taludes, muros de suporte, fundações, elementos estruturais, obras subterrâneas.
***Observação acústica	X	X	X	-	-	X	<sup>5</sup> Estabilidade de taludes, fundações de obras de aterro e de barragens de betão, escavações subterrâneas.

\*H: horizontal; V: vertical; A/O: axial/oblíqua; R: rotacional; S: superficial; I: interna.

\*\*Pertence aos medidores de deformação transversa.

\*\*\*Outros medidores de deformação.

<sup>1</sup>Dunnicliff (1988).

<sup>2</sup>Apenas quando o fenómeno causador da instabilidade prevê uma componente rotacional.

<sup>3</sup>O'Connor & Dowding (2000, 1999). Referem também a determinação do teor de humidade, a medição da pressão neutra e do nível de água, e a deteção de contaminantes.

<sup>4</sup>Brunner et al. (2007), Habel & Krebber (2011), Inaudi & Glisic (in: BiTech, 2007), Iten (2011), Woschitz & Brunner (2008), Zhu (2009). Também utilizados para a medição da pressão neutra e do nível de água, determinação do teor de humidade e medição de tensões. Pode enquadrar-se nos campos da extensometria, clinometria, inclinometria, refletometria, ou observação acústica.

<sup>5</sup>Hunt (2007).

No Quadro 2 apresenta-se um conjunto de instrumentos que podem ser utilizados em detrimento ou complementarmente aos inclinómetros. Neste quadro incluem-se também as principais características de cada instrumento juntamente com algumas observações qualitativas relativamente aos inclinómetros. Dependendo dos constrangimentos financeiros e/ou das especificidades de cada obra, os inclinómetros podem não constituir a opção mais adequada.

Quadro 2-1 – Instrumentação concorrente e complementar aos sistemas inclinométricos – *continua na próxima página.*

Instrumento	Descrição/princípio	Observações comparativamente aos sistemas inclinométricos
<sup>1</sup> <b>Indicadores de plano de corte</b> (estacas de rotura – <i>rupture stakes</i> ; sondas de distorção – <i>shear probe</i> ; fitas de corte – <i>shear strip</i> ).	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecção da presença e da profundidade numa superfície de deslizamento;</li> <li>• instalação de um elemento longitudinal no terreno, de tal forma que intersecte uma possível superfície de deslizamento e que rompa perante a evolução dos deslocamentos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Impossibilidade em definir a orientação dos movimentos internos;</li> <li>• impossibilidade em determinar a magnitude e a velocidade de progressão dos deslocamentos;</li> <li>• deteção de apenas uma ou duas zonas de distorção<sup>3</sup>;</li> <li>• resolução muito grosseira.</li> </ul>
<sup>1</sup> <b>Extensómetros fixos</b> (de cabo, para medição de deformações transversais em furo de sondagem)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecção e acompanhamento da evolução de deslocamentos transversais ou longitudinais;</li> <li>• fixação de um dispositivo numa extremidade e tensionamento na extremidade oposta, de tal forma que a deformação do terreno incorra na alteração da extensão do elemento instalado.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem restrições de plano de inclinação;</li> <li>• impossibilidade em determinar a orientação dos movimentos internos;</li> <li>• resolução e exatidão ligeiramente inferiores;</li> <li>• sem distinção entre deslocamentos horizontais e verticais;</li> <li>• a observação de várias superfícies de distorção requer a instalação de vários dispositivos ancorados em profundidades distintas, o que representa maior custo e maior complexidade;</li> <li>• tendência à deterioração ao longo do tempo e, ao contrário dos inclinómetros, dificilmente substituíveis em caso de avaria ou de manutenção;</li> <li>• desfasamento entre a ocorrência dos deslocamentos iniciais e o início das medições<sup>4</sup>;</li> <li>• propensão a influências térmicas consideráveis;</li> <li>• medição de deformações de maior magnitude (5.8.3);</li> <li>• insensibilidade a interferências eletromagnéticas (3.8);</li> <li>• maior economia relativamente aos inclinómetros fixos (2.4.2) em áreas muito extensas com baixa frequência de leitura e plano de observação de longo prazo.</li> </ul>
<sup>1,2</sup> <b>Cadeias defletométricas</b> (fixas ou portáteis)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detecção e acompanhamento da evolução de deformações transversais;</li> <li>• série de segmentos rígidos ligados por rótulas defletométricas capazes de medir a rotação relativa entre dois segmentos contíguos.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem restrições de plano de inclinação;</li> <li>• aplicação maioritariamente em obras subterrâneas;</li> <li>• instalação semelhante à dos inclinómetros (3), mas sem necessidade de um tubo especializado (3.2), já que as rótulas permitem a medição de rotações em plano axial e transversal;</li> <li>• impossibilidade em detetar a rotação integral da instalação<sup>5</sup>, uma vez que o referencial de rotação é relativo (in ex.: entre rótulas) e não absoluto (in ex.: aceleração gravítica);</li> <li>• propagação do erro exponencial;</li> <li>• repetibilidade inferior relativamente aos sistemas inclinométricos fixos (2.4.2).</li> </ul>

<sup>1</sup>Dunnicliff (1988).

<sup>2</sup>SOLEXPERTS (2014).

<sup>3</sup>As estacas de rotura só permitem detetar a zona de distorção superior, enquanto as sondas de distorção e as fitas de corte permitem detetar até duas zonas (in ex.: inferior e superior).

<sup>4</sup>Devido à diferença de diâmetros entre os cabos e as paredes internas da instalação.

<sup>5</sup>Por exemplo, devido à existência de uma superfície de deslizamento abaixo da base da instalação.

Quadro 2-2 – Instrumentação concorrente e complementar aos sistemas inclinométricos – *continuação*.

Instrumento	Descrição/princípio	Observações comparativamente aos sistemas inclinométricos
<sup>1</sup> <b>Cabos coaxiais</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deteção e acompanhamento da evolução de deformações transversais ou longitudinais;</li> <li>baseados no princípio da reflectometria no domínio do tempo (<i>time domain reflectometry</i> – TDR), inicialmente desenvolvido para testar a integridade de cabos elétricos (Moffitt, 1964);</li> <li>transmissão de uma série de impulsos elétricos ao longo do cabo e medição das respetivas reflexões. O tempo de retorno dos impulsos induzidos e as voltagens refletidas permitem aferir diversas propriedades do meio, como seja a deformação ocorrida no cabo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem restrições de plano de inclinação;</li> <li>instalação semelhante à dos inclinómetros (3), mas sem necessidade de um tubo de alojamento;</li> <li>equipamento de medição substancialmente mais dispendioso, mas com custo e complexidade de instalação inferiores;</li> <li>aplicação complementar aos sistemas inclinométricos para alargamento da área observada com menor custo de instalação ou para prolongamento do tempo de serviço dos tubos após deformação excessiva dos mesmos (5.8.3);</li> <li>calibração em obra requerida para medição da magnitude dos deslocamentos, uma vez que a calibração laboratorial é pouco consistente;</li> <li>aplicabilidade restrita a meios de elevada rigidez com superfícies de corte bem definidas (in ex.: terrenos rochosos, solos duros e em zonas de distorção localizada);</li> <li>impossibilidade em determinar a orientação dos movimentos;</li> <li>impossibilidade em detetar a rotação integral da instalação<sup>4</sup>;</li> <li>exatidão e precisão inferiores;</li> <li>desfasamento entre a ocorrência das deformações iniciais e o início das medições.</li> </ul>
<sup>2</sup> <b>Cabos de fibra ótica</b> (multiplexados; de gabarito longo; distribuídos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deteção e acompanhamento da evolução de deformações transversais, longitudinais ou rotacionais;</li> <li>baseados em princípio semelhante ao TDR, podendo a medição fazer-se em função do tempo de resposta de um sinal, da respetiva análise do espectro de frequências, ou de ambos;</li> <li>um feixe de luz com determinado espectro de frequências propaga-se ao longo duma fibra cristalina devido à reflexão da onda no material de cobertura radial<sup>5</sup>. Variações no material refrativo e/ou no ângulo de incidência influenciam o espectro de frequências e/ou a intensidade luminosa transmitida, permitindo a utilização da própria fibra na forma de sensor.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sem restrições de plano de inclinação;</li> <li>instalação semelhante à dos inclinómetros (3), mas sem necessidade de um tubo de alojamento;</li> <li>equipamento de medição substancialmente mais dispendioso, mas com custo e complexidade de instalação inferiores;</li> <li>aplicação maioritariamente na observação de estruturas, principalmente quando envolvem superfícies muito extensas;</li> <li>facilidade de incorporação em elementos estruturais, materiais geossintéticos ou furos de sondagem;</li> <li>insensibilidade a influências eletromagnéticas (3.8);</li> <li>resistência a elevadas temperaturas e a agentes químicos;</li> <li>possibilidade de observação de perfis praticamente contínuos com um único sensor;</li> <li>melhores características metrológicas e baixo custo de manutenção a longo prazo;</li> <li>maior consumo energético quando a aquisição de dados é automatizada;</li> <li>incerteza relativamente à orientação dos movimentos;</li> <li>ambiguidade na determinação do tipo de deformação sofrido pela fibra.</li> </ul>
<sup>3</sup> <b>Redes wireless de marcadores inteligentes</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Deteção e acompanhamento da evolução de deformações transversais e longitudinais;</li> <li>série de elementos inclinométricos que comunicam entre si através de uma rede sem fios (<i>wireless</i>).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sensibilidade ligeiramente inferior;</li> <li>máxima deformação mensurável muito superior (in ex.: risco de interrupção prematura inexistente);</li> <li>recuperação muito difícil em caso de avaria ou de manutenção;</li> <li>erro potencialmente superior na determinação da orientação dos movimentos;</li> <li>investimento potencialmente superior.</li> </ul>

<sup>1</sup> Blackburn & Dowding (2004); Bordas (1998); Dennis et al. (2006); Dowding et al. (in: BiTech, 2003); Dowding & O'Connor (2000); Dowding et al. (1989, 1988); Farrington & Sargand (2006); Kane (1998); Kane et al. (1996); Kane & Beck (1994); Lin et al. (2009); Lin & Tang (2005).

<sup>2</sup> Bao & Chen (2006); Csipkes et al. (2005); Danisch (1997); Delage et al. (2013); Greenaway et al. (2002); Gue et al. (2015); Habel & Krebber (2011); Hui & O'Sullivan (2009); Inaudi & Glisic (in: BiTech, 2007); Liehr et al. (2010, 2009); Liu et al. (2011); Measures (2001); Moore et al. (2010); Pei et al. (2012); Shi et al. (2003); Sun et al. (2016); Wang et al. (2017); Yin et al. (2010); Yu & Yin (2002); Zhu et al. (2014).

<sup>3</sup> ELEXON (2016a, 2016b); Widzyk-Capehart et al. (2016).

<sup>4</sup> Por exemplo, devido à existência de uma superfície de deslizamento abaixo da base da instalação.

<sup>5</sup> Desde que o índice de refração do material de cobertura seja inferior ao da fibra e o ângulo de incidência do feixe seja inferior ao ângulo de refração do material de cobertura (Bloembergen & Pershan, 1962).





## **2. TIPOS DE EQUIPAMENTO INCLINOMÉTRICO DISPONÍVEIS**

### **2.1. Classificação dos tipos de equipamento inclinométrico**

O equipamento inclinométrico compreende:

- o sensor de medição juntamente com todos os componentes eletrônicos necessários ao seu funcionamento;
- o corpo do instrumento (4.3), o qual inclui uma bitola de referência (in ex.: passo de leitura), e, tradicionalmente, rodas<sup>1</sup> que servem o propósito de facilitar a sua deslocação no interior do tubo e de o manter diametralmente centralizado;
- o cabo de ligação (4.5);
- a(s) unidade(s) de alimentação, aquisição, controlo e armazenamento (4.6).

Os equipamentos inclinométricos para observação geotécnica podem-se classificar em função:

- a) do tipo de sensor (2.2);
- b) do plano de referência (2.3);
- c) da portabilidade (2.4).

### **2.2. Tipos de sensor dos equipamentos inclinométricos (tecnologia)**

#### **2.2.1. Generalidades**

Embora os sensores se possam classificar como uniaxiais, biaxiais ou triaxiais, no presente trabalho o tipo de sensor refere-se apenas à tecnologia (in ex.: princípio de funcionamento), uma vez que, normalmente, os inclinómetros apenas compreendem sensores uniaxiais<sup>2</sup>.

#### **2.2.2. Sensores baseados em ponte de Wheatstone**

##### *2.2.2.1. Contextualização*

A ponte de Wheatstone (1843) é o circuito utilizado para medir variações ou valores absolutos de resistência elétrica. É importante compreender a mecânica geral associada a esta tecnologia, uma vez que é aplicada em todo o tipo de instrumentação que traduza a grandeza a observar por intermédio da variação de uma resistência elétrica.

As resistências que variam juntamente com a grandeza a observar denominam-se elementos ativos<sup>3</sup>. Estes podem variar devido:

- ao efeito piezorresistivo dos materiais condutores (Thomson, 1856), o qual consiste na va-

<sup>1</sup> Atualmente existem sistemas inclinométricos sem elementos rolantes (2.4.2).

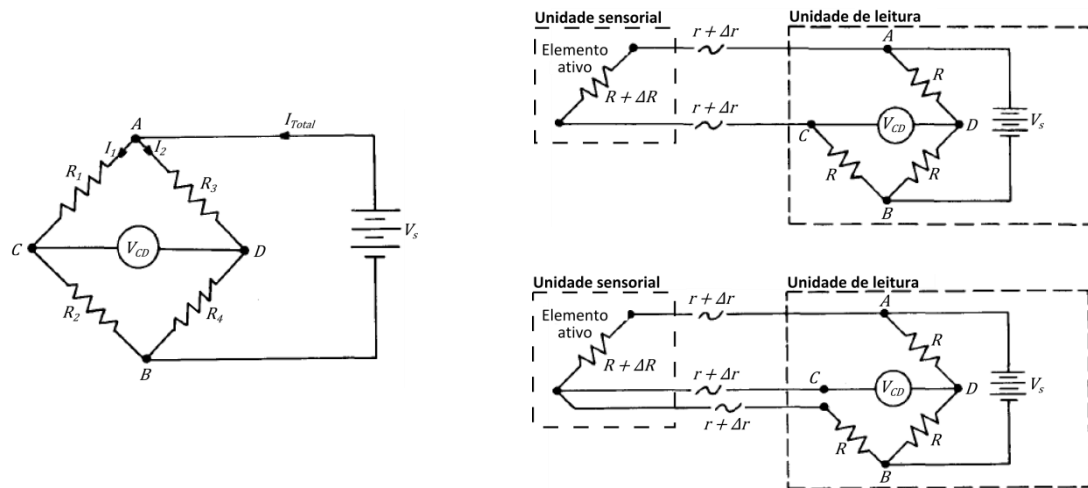
<sup>2</sup> Os inclinómetros biaxiais e triaxiais compreendem dois ou três sensores uniaxiais, respetivamente.

<sup>3</sup> Por exemplo, um fio ou uma grelha metálica sujeita à deformação por efeitos térmicos, de deslocamento estrutural, de variações de pressão ou outros.

riação da sua resistência elétrica em proporcionalidade com a sua deformação (in ex.: coeficiente de Poisson);

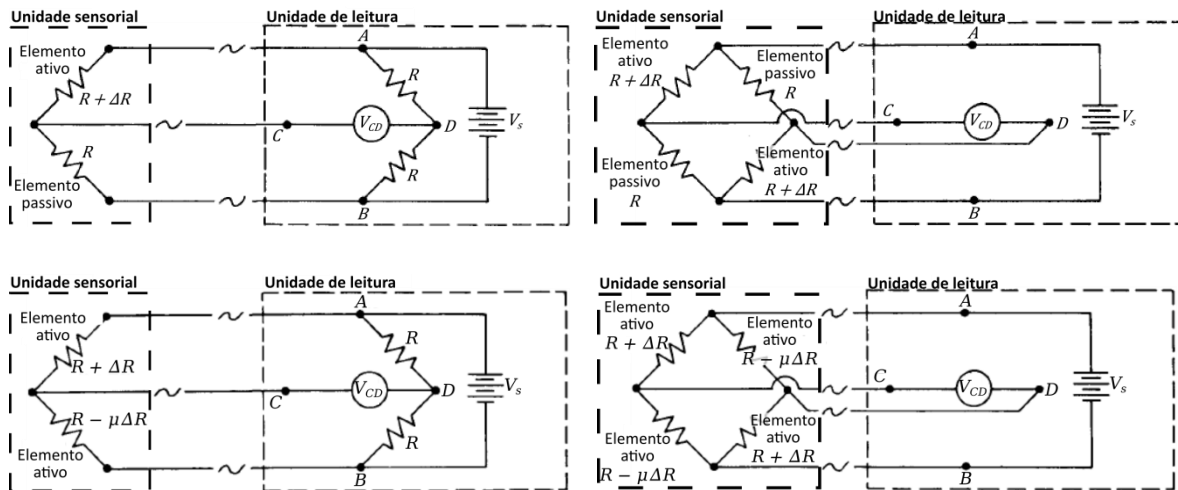
- à alteração da sua condutividade pela variação do meio condutor ou da massa de transporte da corrente (Figura 2c, 1.2; Figura 6, 2.2.2.2);
- à variação diferencial das dimensões das próprias resistências de um ramo da ponte (tipo potenciométrico – Figura 3, 1.2).

Na figura seguinte apresentam-se as configurações mais comuns de ponte de Wheatstone.



a) Ponte de Wheatstone (diagrama genérico).

b) Quarto de ponte de Wheatstone com (diagrama inferior) ou sem (diagrama superior) compensação térmica dos cabos de ligação.



c) Meia ponte de Wheatstone com um (diagrama superior) ou dois (diagrama inferior) elementos ativos.

d) Ponte de Wheatstone completa com dois (diagrama superior) ou quatro (diagrama inferior) elementos ativos.

Figura 5 – Diagramas de circuito aplicáveis à instrumentação baseada em ponte de Wheatstone (adaptado de Dunncliff, 1988).

Observando a Figura 5a:

- a) A corrente injetada no sistema ( $I_{Total}$ ) divide-se em dois ramos paralelos ( $I_1$  e  $I_2$ ), cada um com duas resistências dispostas em série ( $R_i$ ).
- b) Quando  $R_1 = R_3$  e  $R_2 = R_4$ , o potencial  $V_{CD} = 0$ , verificando-se a relação  $R_1/R_2 = R_3/R_4$ . Nestas condições a ponte diz-se equilibrada.
- c) Medição em ponte equilibrada:  $R_2$  é desconhecida e  $R_4$  é variável; a última é regulada até que o equilíbrio seja obtido ( $V_{CD} = 0$ ); a primeira é calculada através da relação apresentada em b).
- d) Medição em ponte não equilibrada:  $R_2$  é desconhecida e  $R_4$  é fixa; a primeira é calculada pela relação direta entre o seu valor e o de  $V_{CD}$ , dada uma determinada corrente de injeção  $I_{Total}$ .

Pela sua conveniência e velocidade de leitura, a ponte não equilibrada é a mais utilizada.

A principal condicionante desta técnica é a variação da resistência devido a variações térmicas. A sensibilidade térmica afeta tanto os elementos sensoriais como os cabos de ligação à unidade de leitura, sendo esta influência crescente com o aumento do comprimento da cablagem. Em instrumentos inclinométricos, utilizados para perfilar furos de sondagem com dezenas de metros de profundidade, compreende-se que esta seja uma influência significativa na qualidade dos dados obtidos. Para minimizar o efeito térmico na cablagem, as resistências utilizadas na ponte são muito superiores à resistência dos cabos de ligação e a ponte é configurada de forma a distribuir a influência térmica por vários elementos. A ponte pode também configurar-se de forma a aumentar o sinal de resposta com a colocação de vários elementos sujeitos à deformação. Na Figura 5b-d ilustram-se as três configurações mais utilizadas na ponte de Wheatstone, designadamente quarto de ponte (Figura 5b), meia ponte (Figura 5c) e ponte completa (Figura 5d).

No caso dos instrumentos inclinométricos convencionais, o diagrama mais frequentemente aplicado é o de meia ponte com dois elementos ativos dispostos em paralelo<sup>1</sup> (Figura 5c). Nesta configuração, a variação de resistência da cablagem é negligenciável e a influência térmica nos elementos ativos é minimizada pelas seguintes razões:

- de forma semelhante ao diagrama inferior da Figura 5b, a introdução de um segundo cabo de retorno distribui a influência que a variação térmica tem na resistência da cablagem;
- as duas resistências em série no elemento sensorial experimentam a mesma variação térmica com polaridades opostas, anulando o desequilíbrio entre os dois ramos paralelos;
- os dois elementos dispostos em paralelo duplicam a magnitude do sinal, aumentando a sensibilidade do instrumento.

Aplicações do tipo esquematizado na Figura 5d, em sensores convencionais, não são comuns na

---

<sup>1</sup> Os dois elementos ativos de uma ponte de Wheatstone podem estar dispostos em paralelo ou orientados a 90° um do outro.

instrumentação inclinométrica para observação geotécnica, encontrando-se apenas em sensores de alta gama, principalmente utilizados nas indústrias militar e médica.

Dunnicliff (1988) refere os seguintes tipos de sensor convencional baseados nesta metodologia:

- Potenciométrico: primeiro inclinómetro moderno (Figura 3, 1.2), baseado em meia ponte de Wheatstone com dois elementos ativos em paralelo.
- Pendular: pêndulo rígido com dois elementos ativos em paralelo (meia ponte de Wheatstone), um de cada lado da haste de suspensão. Quando o instrumento é inclinado, o peso do pêndulo induz uma pequena deformação na haste de suspensão, tensionando os elementos resistentes incorporados.
- De Nível Eletrolítico (Figura 6, 2.2.2.2): de forma análoga ao instrumento apresentado na Figura 2c (1.2), este tipo de sensor baseia-se numa câmara semipreenchida com um líquido condutor, na qual se encontram três elétrodos que, de forma semelhante a um potenciómetro, representam dois elementos ativos de meia ponte de Wheatstone dispostos em paralelo. A porção de eléctrodo mergulhada na solução é proporcional à inclinação da câmara e faz variar a sua resistência.

Os sensores do tipo potenciométrico foram amplamente utilizados em sistemas de sonda (2.4.3) até à década de 1980, altura em que foram substituídos pelos sensores de servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (2.2.4).

Os sensores do tipo pendular terão tido uma utilização limitada numa fase em que a instrumentação inclinométrica ganhou popularidade, entre 1960 e 1970, e os fabricantes, especializados na produção de sensores para outros fins, terão adaptado a tecnologia para alargar a sua oferta. Pois, as referências à utilização de sensores pendulares deste tipo, em sistemas inclinométricos para observação geotécnica, são praticamente inexistentes.

#### *2.2.2.2. Sensores de nível eletrolítico*

Em sistemas inclinométricos e clinométricos, este tipo de sensor concorre diretamente com o servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (2.2.4), sendo o primeiro mais comum em sistemas fixos (2.4.2) e o segundo em sistemas de sonda (2.4.3). Pois, os sistemas fixos apresentam a impossibilidade de inverter o instrumento para executar a mesma medição no sentido oposto (Figura 36, 4.1), anulando o desvio na origem (Figura 46, 5.1), razão pela qual o sensor de nível eletrolítico, com menor deriva (6.3.2), se torna preferível ao servoacelerómetro de equilíbrio de força. Outras razões para a sua preferência em instalações fixas são o menor custo de aquisição e de manutenção, assim como o menor consumo de energia. Na próxima figura apresentam-se alguns exemplos de sensores eletrolíticos.

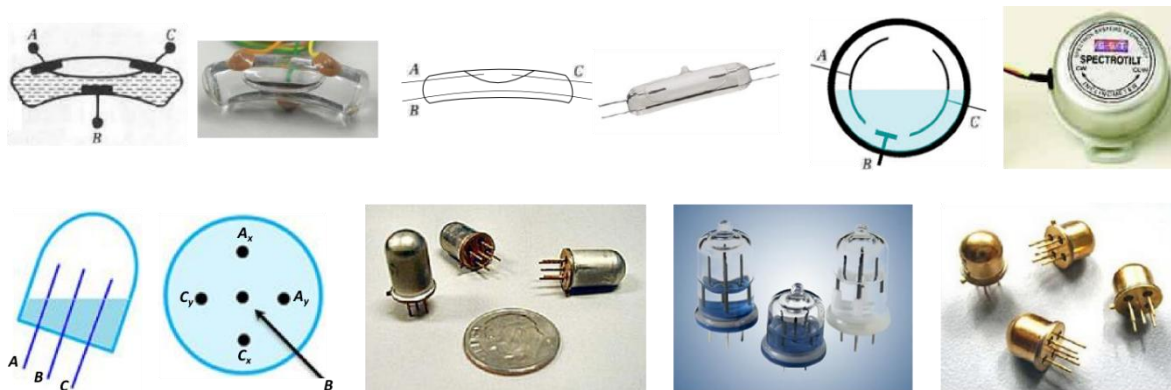


Figura 6 – Exemplos de sensores de nível eletrolítico uniaxiais (em cima) e biaxiais (em baixo), com meia ponte de Wheatstone representada pelas resistências entre os pares de elétrodos AB e BC (adaptado de BesTech, 2017; Dunnicliff, 1988; Puccio, 2004; SPECTRON, 2009; TFC, 2017a, 2017b, 2017c).

### 2.2.3. Sensores de corda vibrante

Os sensores de corda vibrante consistem num sistema pendular rígido acoplado a uma corda de aço, tensionada entre 9 – 13% da tensão de cedência, com uma bobina eletromagnética próxima do seu ponto médio. De forma análoga ao sistema pendular baseado em ponte Wheatstone, Dunnicliff (1988) refere uma configuração de duas cordas e duas bobinas, uma de cada lado do pêndulo, para um sensor uniaxial, e outra de quatro cordas e quatro bobinas para um sensor biaxial. Contudo, há configurações distintas<sup>1</sup>.

Existem fundamentalmente duas versões deste tipo de instrumento:

- a) Em circuito aberto: a bobina excita a corda com um impulso eletromagnético, fazendo-a vibrar na sua frequência natural, e depois transmite a corrente alternada induzida pela vibração a um contador de frequências. Quando o pêndulo é acelerado, devido à variação da inclinação do instrumento, a tensão na corda altera-se e, consequentemente, as frequências da vibração e da corrente induzida aumentam ou diminuem, conforme a variação de tensão seja positiva ou negativa, respetivamente.
- b) Em circuito fechado (autorressonante): existem duas bobinas por corda, uma para excitação e outra para leitura. O sinal de resposta da bobina de leitura é reencaminhado para a bobina de excitação, mantendo a corda em vibração contínua à sua frequência natural.

O método a) é utilizado em medições estáticas/pontuais, enquanto o método b) se aplica a medições contínuas e/ou dinâmicas de baixa frequência. Dunnicliff (1988) refere que a operação em modo autorressonante torna o instrumento permeável a influências eletromagnéticas.

Independentemente do método, a resposta pode obter-se por frequência de vibração ou por amplitude de potencial<sup>2</sup>, sendo a primeira preferível, senão um fator de decisão, na escolha deste tipo de instrumento, pelas seguintes razões (Dunnicliff, 1988):

<sup>1</sup> Por exemplo, GEOKON (2011) refere uma corda e uma bobina por direção.

<sup>2</sup> Neste caso, a medição do sinal de resposta baseia-se em ponte de Wheatstone (2.2.2).

- a resposta por frequência torna negligenciáveis os efeitos que a resistência dos contactos e da cablagem têm nos sensores baseados em ponte de Wheatstone e, por isso, grandes extensões de cabo têm potencialmente melhor desempenho;
- a frequência de um sinal é sempre mais estável do que a sua amplitude de potencial, tornando-a preferível, por exemplo, em instalações fixas com níveis freáticos permanentemente elevados.

Há algumas desvantagens a considerar em inclinómetros deste tipo, com sejam (Dunnicliff, 1988):

- corrosão da corda;
- deformação plástica da corda, por fluência, devida ao nível de tensão instalado;
- escorregamento da corda nos pontos de amarração.

Os fenómenos indesejáveis reduzem a tensão da corda e, conseqüentemente, a frequência de vibração, introduzindo uma deriva do desvio (6.3.2), a qual pode ser brusca e significativa, o que implica o reinício do histórico de observação com uma nova referência (4.2). Dunnicliff (1988) mostra claramente que este tipo de instrumento é propenso a derivas consideráveis e que obriga a cuidados preliminares, ou imediatamente posteriores, à sua instalação para mitigar esta tendência (in ex.: fadiga acelerada da corda através de ciclos térmicos ou de vibração). Provavelmente por esta razão, assim como pelo maior custo e pela menor resistência ao choque, os sensores inclinométricos de corda vibrante não sejam muito comuns, a não ser que haja uma forte razão para a sua preferência em função das condições específicas da sua aplicação.

Tal como os sensores baseados em ponte de Wheatstone, a corda vibrante é sensível a alterações térmicas, pelo que o processamento de dados envolve duas etapas: *a)* cálculo da variação inclinométrica e *b)* posterior correção térmica. O efeito térmico na resposta do sensor afeta a linearidade, pelo que a respetiva correção se faz por regressão polinomial obtida por calibração (4.7).

#### **2.2.4. Sensores de servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética**

Este tipo de sensor tem sido o mais utilizado em sondas inclinométricas portáteis (2.4.3), desde a década de 1980 até à atualidade. A preferência por este tipo de sensor justifica-se pelas seguintes características metrológicas:

- elevada sensibilidade;
- elevada resolução;
- boa linearidade;
- baixa histerese;
- relativa insensibilidade a variações térmicas após o período de aquecimento (4.1).

Os inclinómetros utilizados pelo Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) baseiam-se nesta tecnologia e é especificamente sobre este tipo de sensor

que o presente trabalho se concentra.

O princípio de funcionamento assemelha-se ao pendular, mas em vez de uma resposta em função do deslocamento inercial da massa, esta é ativamente movida para a sua posição inicial e a resposta é dada em função da força necessária à sua reposição. A sequência básica de funcionamento, comum a todos os servoacelerómetros de equilíbrio de força clássicos (in ex.: não micromecanizados; 2.2.5), pode resumir-se pela seguinte sequência de eventos (Figura 7):

1. O oscilador transmite um sinal de excitação às bobinas sensoriais e ao comutador de fase.
2. As bobinas sensoriais produzem um campo magnético, o qual varia conforme a posição da massa excêntrica, e retornam um sinal ao detetor de quadratura.
3. O detetor de quadratura recebe os sinais do comutador de fase e das bobinas sensoriais, e envia ao amplificador operacional um sinal proporcional ao desfaseamento entre os dois sinais recebidos.
4. O amplificador operacional filtra o sinal recebido e transmite um sinal de excitação à bobina de tração e ao circuito de saída.
5. Em função do sinal recebido, a bobina de tração desloca a massa excêntrica até ao ponto em que a resposta das bobinas sensoriais esteja “em fase” com o sinal do comutador de fase, e o circuito de saída gera um sinal de resposta.

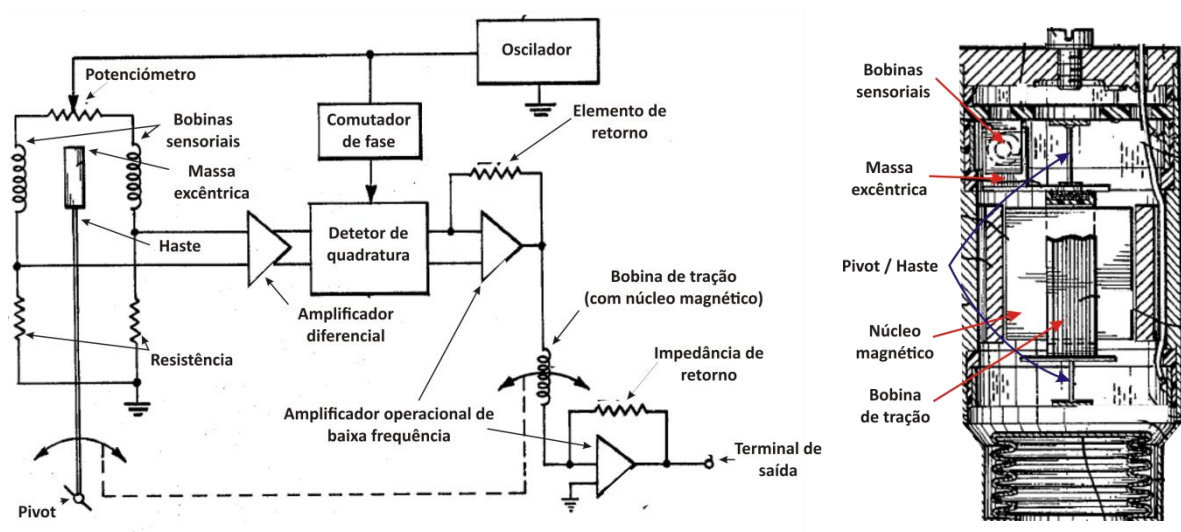


Figura 7 – Diagrama de circuito e estrutura de um servoacelerómetro de equilíbrio de força (adaptado de Hernandez & Gichard, 1978).

Como se depreende, o sinal gerado em 4 é proporcional ao deslocamento da massa pendular e a resposta obtida em 5 é proporcional à corrente necessária para gerar um campo magnético que reponha massa no seu ponto de equilíbrio. Na verdade, a medição faz-se de forma análoga a uma ponte de Wheastone equilibrada, mas baseia-se na variação do campo magnético induzido pelo movimento da massa e não na variação da resistência de um elemento sujeito a deformação.



As principais fragilidades destes sensores são a resistência ao choque e a deriva do desvio (6.3.2). A resistência ao choque compromete não só o alinhamento axial dos acelerómetros, mas também a fragilidade das bobinas sensoriais, cuja integridade garante a correta deteção da posição da massa excêntrica. Para minimizar esta fragilidade, o instrumento deve ser manuseado, transportado e armazenado de acordo com as indicações expressas no capítulo 4. A deriva do desvio é um problema de médio/longo prazo que afeta qualquer tipo de sensor. No entanto, tratando-se de sondas portáteis em bom estado de funcionamento, este problema é largamente mitigado pela natureza dos procedimentos de leitura e de cálculo (4.1; 5.1).

## **2.2.5. Sensores baseados em sistemas microeletromecânicos (MEMS)**

### *2.2.5.1. Contextualização*

Mais do que a simples miniaturização, os MEMS (*micro-electromechanical systems*) constituem o conceito da produção integrada (in ex.: em bloco único) de sistemas completos, englobando, no caso dos instrumentos metrológicos, o sensor e toda a estrutura eletrónica de excitação, tratamento de sinal e resposta. Esta tecnologia foi concetualizada durante as décadas de 1950 e 1960 com base no efeito piezorresistivo aumentado em cristais semicondutores (Barlian et al., 2009) (2.2.5.2), inicialmente previsto por Bardeen & Shockley (1950) e posteriormente caracterizado por Smith (1954). Apesar dos primeiros sensores piezorresistivos cristalinos de carga, deformação e pressão terem surgido durante a década de 1960, a indústria dos MEMS só se formou na década de 1980 e só se estabeleceu definitivamente em finais da década de 1990 (Ghodssi & Lin, 2011; Lindroos et al., 2010). Atualmente estes sistemas encontram-se em praticamente todos os dispositivos eletrónicos de uso quotidiano, médico, industrial, militar ou científico, e há muito que não se limitam ao efeito piezorresistivo cristalino, tendo vindo a substituir todo e qualquer sensor tradicional por uma estrutura monolítica com o mesmo princípio de funcionamento. Ghodssi & Lin (2011), Korvink & Paul (2006) e Lindroos et al. (2010) referem as seguintes vantagens dos MEMS relativamente aos sensores tradicionais:

- menor dimensão;
- menor custo;
- menor consumo energético;
- maior robustez;
- características metrológicas semelhantes ou superiores.

Convém entender que a indústria associada à instrumentação geotécnica é relativamente pequena e produz dispositivos de precisão média a alta, de elevada robustez e de longa vida útil. Devido a estas características, há normalmente um período de tempo alargado entre a introdução de no-

vas tecnologias no mercado e a sua inclusão na instrumentação geotécnica, sendo necessário que os dispositivos de características desejáveis façam parte de um mercado mais alargado para que se tornem economicamente viáveis (Dunnicliff, 1988). No caso particular do acelerómetro, sensor utilizado nos instrumentos (in)clinométricos, foi o crescimento da aplicação de MEMS no setor dos transportes (in ex.: *airbags*, suspensão hidráulica e controlo de estabilidade em viaturas terrestres, aéreas e aeronáuticas) que viabilizou sua inclusão na instrumentação geotécnica (Barlian et al., 2009; Ghodssi & Lin, 2011; Korvink & Paul, 2006; Lindroos et al., 2010; Yazdi et al., 1998).

A incorporação de sensores MEMS nos sistemas (in)clinométricos para observação geotécnica deu-se entre 2003 e 2006, designadamente pela substituição de servoacelerómetros de equilíbrio de força (2.2.4) por MEMS do tipo capacitivo em sistemas portáteis (Dunnicliff, in: BiTech, 2008) (2.2.5.3; 2.4.3). Note-se que a tecnologia dos MEMS é extremamente volátil e encontra-se em franco crescimento há mais de 20 anos, verificando-se uma otimização sistemática da qualidade destes dispositivos e dos respetivos processos de fabrico. Por isso, é expectável a adoção futura de MEMS com diferentes princípios de funcionamento.

Korvink & Paul (2006) começam por classificar os MEMS em função do tipo de energia – *signal ou estímulo* – a que respondem, indicando também as grandezas passíveis de se observar que poderão estar associadas a cada situação (Quadro 3). No caso dos inclinómetros, o tipo de estímulo de interesse é o mecânico, designadamente a determinação da inclinação e da sua alteração devida à força inercial exercida pela ação da aceleração gravítica. Trata-se, portanto, de sensores mecânicos inerciais do tipo acelerométrico (Quadro 4), dos quais interessa abordar particularmente as tipologias piezoelétrica (2.2.5.2), piezorresistiva (2.2.5.3), capacitiva (2.2.5.4), convectiva (2.2.5.5) e eletrolítica (2.2.5.6). Pois, estes são os princípios de funcionamento mais utilizados e que apresentam melhores relações custo/qualidade.

Quadro 3-1 – Classificação dos MEMS em função do tipo de energia de ativação e das grandezas passíveis de se observar (adaptado de Korvink & Paul, 2006) – *continua na próxima página*.

Tipo de estímulo		Grandezas observadas	Observações
Mecânico:	<i>Determinação do estado mecânico:</i>	Posição, orientação, inclinação, velocidade, aceleração, deslocamento, topografia, deformação, distorção, tensão, densidade, massa, frequência de ressonância.	O estado mecânico inicial é geralmente necessário para a observação das causas externas à sua alteração.
	<i>Causas para a alteração do estado mecânico:</i>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Forças localizadas e de torção (magnitude/direção).</li> <li>• Forças inerciais.</li> <li>• Forças distribuídas (pressões/ondas de choque).</li> <li>• Pressão acústica (impedância/frequência/comprimento de onda/velocidade).</li> <li>• Tensão de corte e fluência.</li> </ul>	
Elétrico:		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Voltagem, campo elétrico (intensidade/direção), corrente e potência.</li> <li>• Carga, capacitância, constante dielétrica, polarização, indutância, resistência e impedância.</li> <li>• Frequência, desfaseamento, perda dielétrica, tempo de cadência e de ciclo.</li> <li>• Distribuição de espectro (densidade de ruído/amplitude e desfaseamento de frequências marginais à de transporte).</li> </ul>	Presente em todos os sistemas MEMS para promover a excitação sensorial e a receção, tratamento e conversão da resposta.

Quadro 3-2 – Classificação dos MEMS em função do tipo de energia de ativação e das grandezas passíveis de observar (adaptado de Korvink & Paul, 2006) – *continuação*.

Tipo de estímulo	Grandezas observadas	Observações
<b>Térmico:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Temperatura, entropia, entalpia e energia disponível.</li> <li>• Capacidade e condutividade térmica.</li> <li>• Quantidade, transferência e potência térmica.</li> <li>• Resistência, condutância e impedância térmica.</li> <li>• Constante térmica e desfaseamento.</li> </ul>	-
<b>Magnético:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campo e indução magnético(a) (amplitude/direção).</li> <li>• Momento magnético e magnetização.</li> <li>• Permeabilidade e suscetibilidade magnética.</li> </ul>	-
<b>Radiante:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Densidade e fluxo de energia de radiação eletromagnética.</li> <li>• Polarização, coerência e desfaseamento.</li> <li>• Densidade de espectro.</li> <li>• Refletância, transmitância e absorvência.</li> <li>• Trânsito, velocidade e energia de partículas carregadas.</li> </ul>	-
<b>Químico:</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração, composição e pH.</li> <li>• Potencial químico, eletroquímico e de redução.</li> <li>• Taxa de reação e constantes de equilíbrio.</li> </ul>	-

Quadro 4 – Categorização dos MEMS mecânicos em função do tipo de grandeza que medem e dos princípios de funcionamento aplicáveis (adaptado de Korvink & Paul, 2006).

Categoria	Grandezas observáveis	Tipo	Princípio de funcionamento
Inerciais	Aceleração Velocidade angular	Acelerométricos	Piezoelétricos
			Piezorresistivos
			Capacitivos
			Termorresistivos/Convectivos
			Eletrolíticos
			Por corrente de tunelamento
			Ressonantes
			Óticos
		<sup>1</sup> Giroscópicos	Piezoelétricos
			Magnéticos
			Capacitivos
Pressiométricos	Pressão	Pressiómetros	Piezorresistivos
			Capacitivos
			Acústicos
			Ressonantes
De força e torção	Força/Carga Momento Torção/Rotação	<sup>2</sup> Transdutores de força	Piezorresistivos
			Ressonantes

<sup>1</sup>Requerem excitação ressonante.

<sup>2</sup>Semelhantes aos inerciais, mas o sistema sensorial inclui a macroestrutura onde o sensor está anexado.

#### 2.2.5.2. MEMS acelerométricos piezoelétricos

A piezoelectricidade é a capacidade dum material colocado sob tensão gerar um diferencial elétrico por polarização, sendo este fenómeno invertível (APS, 2014). Esta propriedade, comumente presente em cristais (in ex.: quartzo), é explorada desde o século XIX, tanto na forma de sensor (in ex.: transdutores de pressão) como de atuador (in ex.: válvulas). A sua exploração no universo MEMS é relativamente recente e obriga à inclusão de materiais piezoelétricos na estrutura de silí-

cio<sup>1</sup>, seja por deposição superficial (*thin film deposition*) ou por um processo de contaminação atômica (*doping*) da estrutura cristalina siliciosa (Korvink & Paul, 2006; Tadigadapa & Mateti, 2009; Yazdi et al., 1998).

Este tipo de acelerômetro baseia-se normalmente na deflexão de uma haste siliciosa piezoelétrica, cuja resposta se obtém em função do potencial elétrico que resulta do esforço induzido na haste e que é geralmente capturado num condensador por capacitância (Chen et al., 1982; Yazdi et al., 1998). Embora se reconheçam propriedades atrativas (in ex.: facilidade de produção monolítica e autoverificação intrínseca), a sensibilidade deste tipo de sensor diminui proporcionalmente à escala de miniaturização e a sua resposta requer correção térmica. Outra desvantagem é a recorrência a processos de fabrico dispendiosos e difíceis de implementar para a incorporação de elementos piezoelétricos na estrutura cristalina. Portanto, os MEMS capacitivos (2.2.5.4) são preferíveis para medição de acelerações estáticas, tendo os MEMS piezoelétricos maior aplicação na medição de forças e pressões (Korvink & Paul, 2006; Tadigadapa & Mateti, 2009).

#### 2.2.5.3. MEMS acelerométricos piezorresistivos

Este tipo de sensor consiste numa plataforma (in ex.: haste ou pêndulo rígido) de silício suspensa por elementos de ligação, ou suportes, que formam as resistências de uma ou de meia ponte de Wheatstone, de forma semelhante aos sensores pendulares referidos em 2.2.2.

A condução elétrica em cristais semicondutores, geralmente à base de silício, germânio ou gálio, dá-se através das impurezas atômicas contidas na malha cristalina. Quando o cristal é relativamente puro a condução elétrica é bem definida e, devido à anisotropia induzida pela configuração cristalográfica, o efeito piezorresistivo pode ser ampliado ou reduzido até um fator que pode chegar às centenas. Controlando o nível, o tipo e a distribuição das impurezas presentes na rede cristalina (in ex.: fósforo, boro, arsénio, alumínio, antimónio, tântalo, telúrio, entre outros), como também os planos cristalográficos utilizados para a condução elétrica e para a aplicação de tensão, o efeito piezorresistivo destes materiais pode ser dezenas ou centenas de vezes superior aos metais. Logo, um sensor cristalino tem uma sensibilidade muito superior à de um sensor convencional (in ex.: metálico) e permite medir variações muito menores da grandeza observada (Barlian et al., 2009; Korvink & Paul, 2006; Yazdi et al., 1998).

No âmbito da medição de inclinações, comparativamente a sensores baseados noutros princípios de funcionamento (in ex.: sensores capacitivos), Yazdi et al. (1998) e Korvink & Paul (2006) refe-

---

<sup>1</sup> Os materiais piezoelétricos mais comumente utilizados são o óxido de zinco (ZnO), o zirconato titanato de chumbo (PZT) e o nitreto de alumínio (AlN). Estes elementos podem ser introduzidos na própria estrutura siliciosa do sensor ou ser produzidos separadamente e posteriormente acoplados. Quando produzidos separadamente, também podem ser constituídos em quartzo (Korvink & Paul, 2006; Tadigadapa & Mateti, 2009).

rem as seguintes desvantagens dos MEMS piezorresistivos:

- elevada sensibilidade a variações térmicas;
- reduzida sensibilidade metrológica;
- propensão para desvios e derivas consideráveis;
- grande dimensão dos sensores, por requererem maiores massas suspensas;
- produção monolítica mais complexa e dispendiosa, também requerendo maior volume;
- ausência de autoverificação intrínseca, requerendo um sistema de excitação independente para verificar o bom funcionamento do sensor.

Por estas razões, a par da sua crescente utilização no setor automóvel, os MEMS capacitivos (2.2.5.4) vieram substituir os MEMS piezorresistivos durante a década de 1990.

#### *2.2.5.4. MEMS acelerométricos capacitivos*

Este tipo de sensor baseia-se no efeito capacitivo<sup>1</sup> de dois elementos condutores, muito próximos e separados por um material não condutor, quando lhes é aplicado um potencial de corrente. São constituídos por duas estruturas, uma fixa e outra móvel, que representam os dois elétrodos. A estrutura móvel, suspensa por elementos elásticos, constitui a massa sísmica que responde à força inercial. Quando a massa é acelerada e se desloca, o espaçamento entre os elétrodos diminui ou aumenta, dependendo da direção do movimento, o que resulta, respetivamente, num aumento ou numa diminuição da capacitância, proporcional à aceleração aplicada. Para melhorar a linearidade, aumentar a sensibilidade e diminuir o desvio do sensor, a sua configuração é geralmente diferencial<sup>2</sup>. Para aplicações (in)clinométricas de precisão, os sensores são normalmente servo-acelerados<sup>3</sup>, tratando-se, efetivamente, de um servoacelerómetro de equilíbrio de força (2.2.4) cuja resposta é função da força necessária à reposição da massa, mas a grandeza variável é a capacitância e não a indução magnética. Nas figuras 8 e 9 apresenta-se este tipo de sensor nas versões servoaceleradas não diferencial e diferencial, respetivamente.

No âmbito dos MEMS inerciais, Korvink & Paul (2006) indicam a preferência por este tipo de sensor para medições acelerométricas pelos seguintes motivos:

- maior exatidão;
- melhor linearidade;
- estabilidade térmica, não requerendo compensação;
- maior facilidade de calibração (4.7);

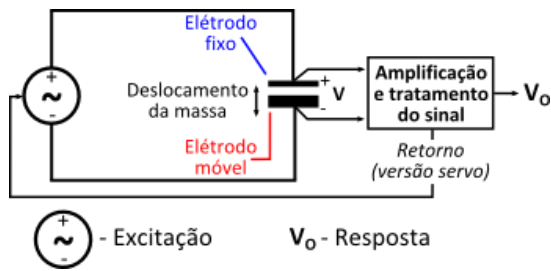
---

<sup>1</sup> Capacidade de acumulação de carga elétrica por polarização de um material não condutor entre elétrodos submetidos a uma carga diferencial (EBO, 2017a).

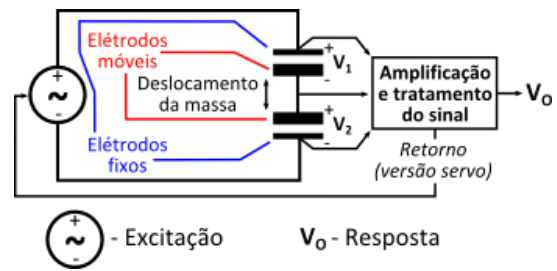
<sup>2</sup> Na configuração diferencial existem dois elétrodos fixos, um de cada lado do elétrodo móvel, de tal forma que o aumento da capacitância de um lado corresponda à diminuição da capacitância do lado oposto (Figura 9).

<sup>3</sup> Em circuito servoacelerado o sinal de resposta à variação da capacitância é reencaminhado para o circuito de alimentação e atua fisicamente sobre a estrutura móvel, deslocando-a novamente para a sua posição de equilíbrio (Figura 8; Figura 9).

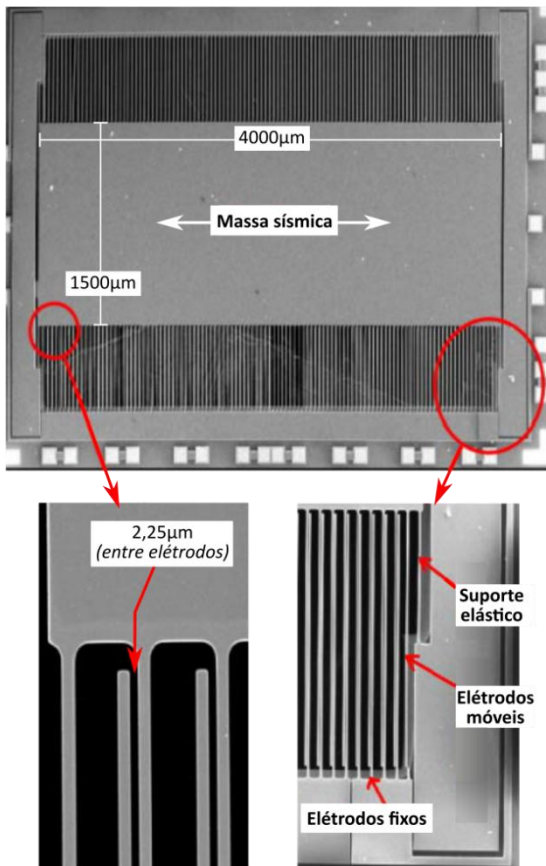
- intrinsicamente autoverificáveis quando servoacelerados;
- produção monolítica fácil e em processo único, baixo custo relativo e menor dimensão.



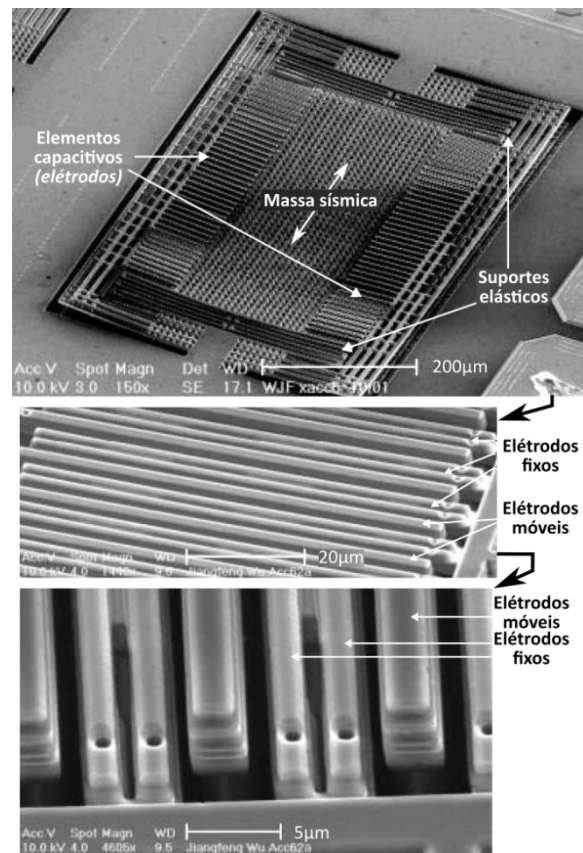
a) Diagrama simplificado.



a) Diagrama simplificado.



b) Acelerômetro capacitivo servoacelerado não diferencial.



b) Eletromicrografia de um acelerômetro capacitivo servoacelerado diferencial.

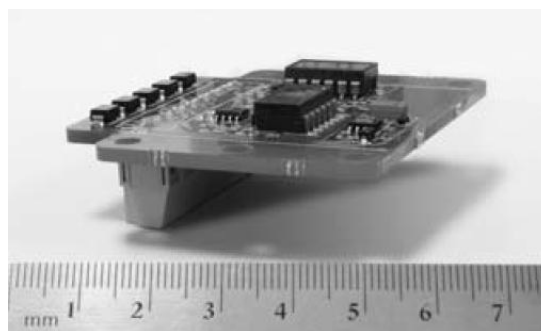
Figura 8 – Acelerômetro capacitivo servoacelerado não diferencial (adaptado de Mukherjee et al., 2014).

Figura 9 – Acelerômetro capacitivo servoacelerado diferencial (adaptado de Wu, 2002).

Dunnicliff (in: BiTech, 2008) refere a introdução deste tipo de sensor em sistemas (in)clinométricos portáteis (2.4.3) por parte dos fabricantes Soil Instruments (desde 2003), RST Instruments Ltd. (desde 2005) e Geokon Inc. (desde 2006). Atualmente, a Slope Indicator também disponibiliza inclinômetros digitais baseados em MEMS, mantendo a oferta de sistemas clássicos. Na Figura 10 apresentam-se dois exemplos de MEMS incorporados em (in)clinômetros.



a) MEMS capacitivos incorporados num inclinómetro biaxial da Geokon.



b) MEMS capacitivos incorporados num clinómetro biaxial da RST Instruments Ltd..

Figura 10 – Sensores MEMS incorporados na instrumentação (in)clinométrica (adaptado de Sellers & Taylor, in: BiTech, 2008).

Sellers & Taylor (in: BiTech, 2008) fazem um breve resumo sobre os sensores utilizados na instrumentação (in)clinométrica e indicam a capacitância diferencial como o princípio de funcionamento genericamente adotado. Os autores referem as mesmas vantagens indicadas por Korvink & Paul (2006), como também a compatibilidade com as unidades de aquisição atuais de sinal analógico (4.6) e, comparativamente aos servoacelerómetros clássicos, maior resistência ao choque, menor custo, menor deriva (6.3.2) e menor consumo energético. A única desvantagem referida é uma sensibilidade ligeiramente inferior para determinada amplitude de medição.

#### 2.2.5.5. MEMS acelerométricos termorresistivos/convectivos

Os MEMS convectivos, tal como os eletrolíticos (2.2.5.6), surgiram na década de 1990, na sequência da expansão comercial dos dispositivos microfluídicos<sup>1</sup> (Korvink & Paul, 2006).

As primeiras versões consistem numa base siliciosa fixa com uma massa sísmica móvel, sendo uma parte aquecida e outra munida de um dispositivo para medição de temperatura. A difusão de calor entre as duas partes, função do seu espaçamento, permite deduzir a aceleração gravítica a que o sensor está sujeito (Dauderstädt et al., 1995; Hiratsuka et al., 1992; Yazdi et al., 1998).

As versões mais recentes não contêm partes móveis e baseiam-se na transferência térmica por convecção de uma bolha de gás aquecido (Dao et al., 1996; Yazdi et al., 1998). Leung et al. (1998,

<sup>1</sup> Os dispositivos microfluídicos destinam-se à manipulação de quantidades muito pequenas de fluido (in ex.: à escala micro e nano). Surgiram no início da década 1950 e têm sido gradualmente introduzidos no mercado desde a década de 1980, sendo principalmente utilizados nas indústrias química, biotecnológica, médica, farmacêutica e militar, embora o seu campo de aplicação seja mais abrangente (in ex.: na impressão a jato de tinta).

1997) apresentam uma estrutura simples e monolítica, cujo fabrico requer um processo único. O acelerómetro consiste numa base siliciosa com uma cavidade, sobre a qual se suspende um elemento central de aquecimento e uma série de outros elementos para medição da temperatura, diametralmente e paralelamente dispostos relativamente ao primeiro. O aquecimento do elemento central origina a formação de uma pequena bolha de gás aquecido, a qual se move ao longo da cavidade em função da aceleração imposta ao instrumento. O perfil da distribuição térmica ao longo da cavidade permite deduzir o valor da aceleração.

O circuito de medição da temperatura baseia-se numa ponte de Wheatstone (2.2.2), podendo os elementos sensoriais ser constituídos por termístores<sup>1</sup> ou por termopares<sup>2,3</sup> acoplados (Milanovic et al., 2000), permitindo os últimos a redução significativa do consumo energético e o aumento da sensibilidade. Embora a sensibilidade dependa diretamente do consumo energético (in ex.: temperatura de aquecimento), pode também ser melhorada com o aumento da densidade do gás, pela substituição do gás por um fluido viscoso, ou com a otimização da geometria do sensor (Bahari & Leung, 2011; Chen et al., 2008; Crespy et al., 2008; Giani et al., 2009; Leung et al., 1998, 1997; Liao et al., 2006; Mailly et al., 2003a, 2003b; Park et al., 2011).

Refere-se as seguintes vantagens dos MEMS convectivos relativamente a outras tecnologias (Liu & Zhu, 2017):

- maior resistência ao choque; pois não têm partes móveis nem suportes flexíveis;
- menor propensão a derivas de desvio (6.3.2);
- boa linearidade;
- intrinsecamente autoverificáveis;
- facilmente integrados em sistemas monolíticos;
- insensíveis a influências eletromagnéticas;
- custo muito baixo; pois incorporam estruturas muito simples e robustas, de produção fácil e rápida, requerendo um processo único de fabrico.

São também considerados os seguintes inconvenientes (Liu & Zhu, 2017):

- consumo energético elevado;
- sensibilidade reduzida e dependente da temperatura ambiente, requerendo isolamento térmico eficaz;
- resolução limitada;

---

<sup>1</sup> Um termistor é um dispositivo ou material semicondutor que apresenta um elevado coeficiente térmico negativo de resistência elétrica. Ou seja, a resistência elétrica de um termistor decresce significativamente com o aumento da temperatura (IEC, 1982).

<sup>2</sup> Um termopar é uma junção de dois elétrodos, em circuito aberto, cujos coeficientes térmicos são significativamente diferentes (in ex.: dois metais diferentes). Devido à diferença entre as propriedades térmicas e elétricas dos dois materiais, a radiação energética sobre a junção induz um potencial elétrico que lhe é proporcional e que pode ser medido por outros meios (IEC, 1987a).

<sup>3</sup> Um termopar acoplado, ou termopilha, é constituído pela junção de vários termopares, sendo a energia de radiação medida pelo efeito que provoca nesse agrupamento (IEC, 1987b).



- tempo de resposta relativamente longo.

A simplicidade estrutural e o baixo custo deste tipo de sensor tem atraído muito interesse por parte de vários investigadores, que têm conseguido introduzir melhorias significativas no sentido de ultrapassar os inconvenientes acima referidos (in ex.: Bahari & Leung, 2011; Billat et al., 2002, 2001; Chen et al., 2008; Combette et al., 2007; Crespy et al., 2008; Garraud et al., 2011a, 2011b; Giani et al., 2009; Liao et al., 2006; Ma & Leung, 2008; Mailly et al., 2003a, 2003c, 2003b; Milanovic et al., 2000; Park et al., 2011; Tsang et al., 2008). Há também a tentativa de desenvolver MEMS convectivos sem recurso a estruturas de silício, a fim de eliminar os processos de fabrico convencionalmente utilizados na indústria dos circuitos integrados e, assim, reduzir o custo de fabrico, melhorar o isolamento térmico e reduzir o consumo energético (in ex.: Petropoulos et al., 2011; Rocha et al., 2011; Silva et al., 2012). O interesse industrial está também presente, sendo provável que a aplicação de MEMS convectivos em sistemas instrumentais acelerométricos/inclinométricos cresça no futuro (in ex.: Bugnacki et al., 2001; Cai et al., 2013; DW&A, 2010; Fennelly, 2016; Fennelly et al., 2012; Pyle & Emerald, 2002; Wu & Grace, 2013).

#### 2.2.5.6. MEMS acelerométricos eletrolíticos

Este tipo de sensor tem sido desenvolvido a par do convectivo (2.2.5.5). Existem fundamentalmente dois tipos de sensor eletrolítico que têm sido explorados no universo dos MEMS:

- a) eletrorresistivo (Figura 11);
- b) capacitivo (Figura 12).

Os sensores do tipo a) baseiam-se na medição da resistência elétrica entre dois elétrodos parcialmente mergulhados numa solução condutora. O valor dessa resistência varia em função da porção de eletrodo submerso, por sua vez proporcional à inclinação do sensor. A mecânica sensorial é igual à de um sensor homólogo convencional (2.2.2.2), recorrendo também a meia ponte de Wheatstone (2.2.2) para medição dos valores de resistência elétrica.

São indicadas as seguintes vantagens (Choi et al., 2013; Jung et al., 2007; Kang et al., 2005; Lee & Lee, 2011; Lee et al., 2013):

- baixo custo;
- menor consumo energético;
- maior resistência ao choque;
- menor deriva de desvio (6.3.2);
- intrinsecamente verificável;
- facilidade de integração monolítica.

Para além das desvantagens referidas em 2.2.2.2, são ainda reconhecidas algumas dificuldades

associadas à sua produção (Choi et al., 2013; Jung et al., 2007; Kang et al., 2005; Lee & Lee, 2011; Lee et al., 2013):

- à escala dos MEMS, a tensão superficial pode introduzir alguma histerese;
- a constituição dos elétrodos não é fácil e obriga a cuidados especiais, já que o processo envolve a deposição de uma solução iónica sobre uma superfície tridimensional;
- a geometria do sensor afeta fortemente o seu tempo de resposta, assim como o eventual comportamento histerético.

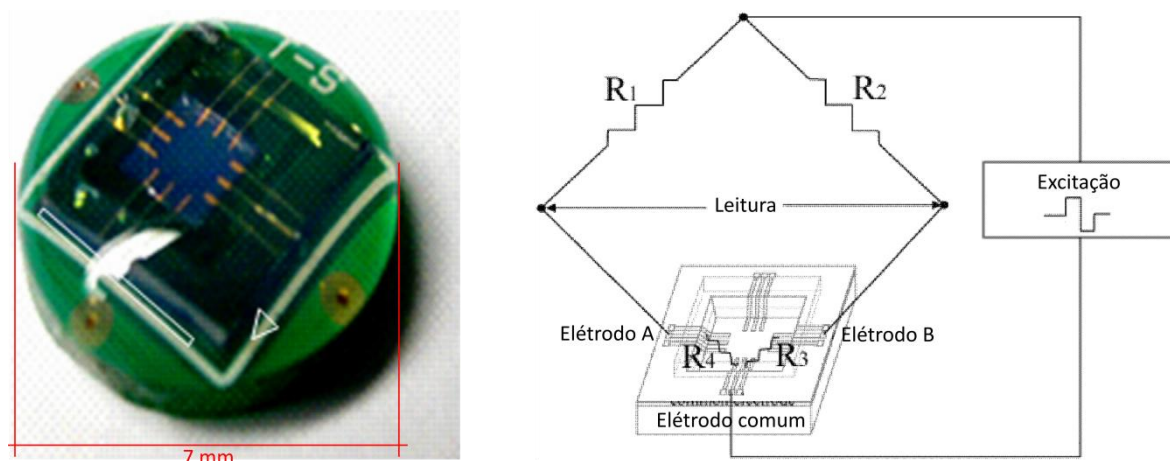


Figura 11 – Exemplo de sensor MEMS eletrolítico eletroresistivo (adaptado de Jung et al., 2007).

Os sensores do tipo *b*) baseiam-se na medição da capacitância (2.2.5.4) entre dois elétrodos parcialmente mergulhados numa solução dielétrica<sup>1</sup>. Tal como acontece com os sensores do tipo *a*), o valor de capacitância varia em proporção com a porção de eléctrodo submerso.

Relativamente aos sensores do tipo *a*), estes apresentam as seguintes vantagens (Benz et al., 2005; Ueda et al., 2006; Yotter et al., 2003):

- melhor linearidade;
- melhor resolução;
- menor tempo de resposta;
- menor sensibilidade térmica.

Contudo, esta técnica também apresenta algumas desvantagens (Benz et al., 2005; Ueda et al., 2006; Yotter et al., 2003):

- consumo energético superior;
- obriga à criação de estruturas complexas que reduzam a influência da tensão superficial e promovam o preenchimento homogéneo da cavidade;
- a amplitude de resposta é inversamente proporcional à dimensão do sensor, afetando

<sup>1</sup> Uma solução dielétrica é aquela em que o soluto tem a capacidade de se polarizar na presença de um campo eléctrico (EBO, 2017b). Quanto menor for a condutividade eléctrica dessa solução maior será a sua capacitância (capacidade de armazenar carga eléctrica nessas circunstâncias – ver secção 2.2.5.4).

também a sua sensibilidade.

Atualmente este tipo de sensor já se encontra incorporado nos sistemas inclinométricos fixos (in ex.: DGSI, 2014a, 2013a; GEOKON, 2017a; ROCTEST, 2016; SISGEO, 2017a; SOIL, 2014a). Note-se que nem todos os fabricantes especificam o princípio de funcionamento do sensor. No entanto, a necessidade de compensação térmica e de ajuste polinomial, a fim de se obter o desempenho especificado, permitem deduzir o tipo de sensor utilizado.

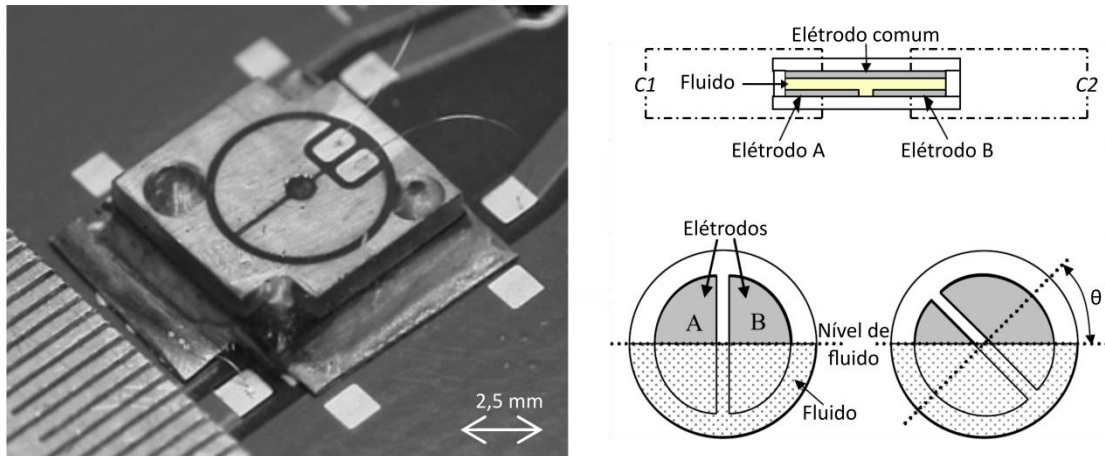


Figura 12 – Exemplo de sensor MEMS eletrolítico capacitivo (adaptado de Ueda et al., 2006).

### 2.3. Planos de referência dos equipamentos inclinométricos

O plano de referência de um inclinómetro é aquele que corresponde a inclinação nula quando a bitola (in ex.: o corpo do instrumento; 4.3) lhe está perfeitamente alinhada. Neste âmbito, os inclinómetros podem ser classificados como (Dunnicliff, 1988):

- a) **Horizontais**: são instalados no plano horizontal e medem inclinações relativamente a esse plano, permitindo calcular os deslocamentos ocorridos no plano vertical.
- b) **Verticais**: são instalados no plano vertical e medem inclinações relativamente a esse plano, permitindo calcular os deslocamentos ocorridos no plano horizontal.
- c) **Oblíquos**: são instalados num plano intermédio entre o horizontal e o vertical, normalmente no intervalo  $45 - 60^\circ$ , permitindo calcular os deslocamentos ocorridos no plano que lhe seja perpendicular.

A diferença entre os três tipos de inclinómetro está na relação entre as orientações da bitola e do sensor, uma vez que a orientação absoluta do sensor é sempre a mesma<sup>1</sup> (Figura 13). Este facto tem algumas implicações que interessa abordar:

- Os inclinómetros do tipo *b*) com sensores convencionais (in ex.: não baseados em MEMS; 2.2) têm menor diâmetro que os restantes e, por isso, estão menos limitados relativamente à amplitude máxima dos deslocamentos mensuráveis (5.8.3).

<sup>1</sup> Os acelerómetros inerciais encontram-se sempre alinhados com o plano da aceleração gravítica.

- Os inclinómetros do tipo *c*) não permitem a redundância de leituras (4.1), uma vez que não é possível inverter a orientação do instrumento. Este facto implica a não eliminação do desvio na origem, traduzindo-se em menor exatidão, menor repetibilidade e maior impacto da deriva do desvio nas leituras inclinométricas (6.3.2).

Os inclinómetros do tipo *c*) destinam-se principalmente à observação de maciços cujos planos potenciais de escorregamento são oblíquos (in ex.: encostas ou taludes rochosos), ou ao acompanhamento de movimentos ao longo da superfície de taludes em obras de aterro (Dunnicliff, 1988). Embora este tipo de inclinómetro se mantenha disponível no mercado (in ex.: SOIL, 2014b), a sua utilização é pouco expressiva. Pois, as amplitudes de medição dos instrumentos de tipo *a*) e *b*), normalmente entre  $\pm 30^\circ$  e  $\pm 60^\circ$ , podendo chegar até  $\pm 90^\circ$  (Quadro 20, 6.2.1), permitem cobrir estas situações mantendo, ou mesmo melhorando, a qualidade das medições.

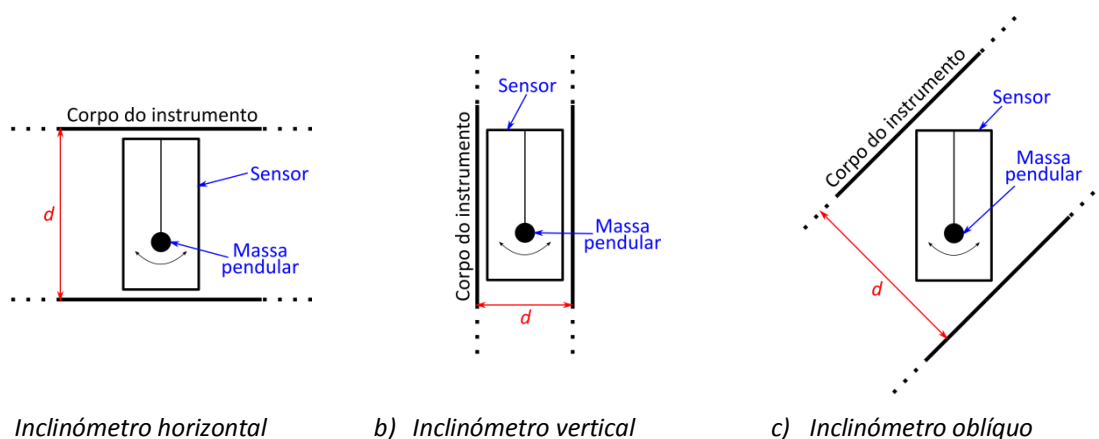


Figura 13 – Representação da relação entre a orientação de uma bitola com sensor inclinométrico convencional e o diâmetro (*d*) do inclinómetro.

## 2.4. Portabilidade dos equipamentos inclinométricos

### 2.4.1. Generalidades

Relativamente à portabilidade, os equipamentos inclinométricos podem ser:

- a) fixos (2.4.2);
- b) de sonda<sup>1</sup> (2.4.3).

Os equipamentos do tipo *a*) representam maior custo, já que equivalem a uma série de inclinómetros encadeados entre si. Exigem também maior complexidade ao nível do sistema de recolha e armazenamento de leituras. Portanto, adequam-se melhor a determinadas situações com requerimentos específicos, tais como (Dunnicliff, 1988):

- frequência de medição muito elevada (in ex.: acompanhamento da execução de escavações

<sup>1</sup> Também designados móveis ou portáteis.

ou aterros em locais de risco);

- número de instalações muito elevado, de forma a permitir uma redução dos custos de observação e de manutenção dos equipamentos (in ex.: escavações, aterros ou taludes naturais com extensão muito apreciável);
- local de acesso muito difícil (in ex.: acessibilidade impedida durante o período de inverno, localidades muito remotas sem acesso adequado, ou zonas de obra instrumentadas que ficam inacessíveis durante e/ou após a sua conclusão).

Os sistemas *b)* são normalmente preferíveis por representarem menor custo, melhores características metrológicas e maior versatilidade (Dunnicliff, 1988).

#### **2.4.2. Equipamentos inclinométricos fixos**

Os equipamentos fixos são constituídos por uma série de segmentos rígidos, encadeados entre si por rótulas resistentes à torção ou suspensos em série por cabos de aço. Cada segmento compreende uma bitola com o(s) respetivo(s) sensor(es), normalmente do tipo eletrolítico (2.2.2.2; 2.2.5.6), permitindo ajustar o passo de leitura às necessidades locais de cada instalação<sup>1</sup>. O sistema é suspenso no topo do tubo e permanece no local durante todo o período de observação, sendo eventualmente substituído ou removido temporariamente para calibração quando esse período é longo (in ex.: superior a um ano). Na Figura 14 apresenta-se um exemplo de aplicação de um sistema inclinométrico fixo.

A ligação elétrica entre segmentos pode fazer-se em paralelo ou em série (in ex.: multiplexada<sup>2</sup>). Ao contrário da ligação em série, a ligação em paralelo implica a existência de um cabo elétrico por cada segmento, limitando o número de sensores em função do diâmetro do tubo inclinométrico. O número de sensores em série que é possível instalar numa determinada instalação depende do comprimento do tubo, da capacidade da unidade de multiplexação e dos recursos de alimentação energética requeridos. Normalmente é possível instalar até 50 a 25 sensores em série em tubos de 40 a 200 *m*, respetivamente<sup>3</sup> (DGSI, 2014a; GEOKON, 2016a; ROCTEST, 2016).

A recolha de dados pode fazer-se de forma manual ou automática. A recolha manual implica intervenção humana para obtenção de dados, enquanto a recolha automática implica o funcionamento autónomo do sistema de acordo com as operações pré-programadas.

---

<sup>1</sup> Por exemplo, podem-se instalar segmentos mais curtos nas profundidades onde se esperam deslocamentos, alargando o passo nas restantes zonas do tubo inclinométrico, ou pode-se instalar uma ou várias séries apenas nas profundidades críticas e com o passo de leitura adequado (DGSI, 2014a, 2013a).

<sup>2</sup> A transferência de dados multiplexada (*multiplexed data transfer*) é uma técnica que combina várias fontes de dados num sinal único, podendo a identificação do sinal de cada fonte fazer-se em função da sua frequência de transmissão, do tempo de transmissão que lhe é atribuído, ou de uma série de dados específica que identifica o início e o final da respetiva transmissão (TCEE, 2013).

<sup>3</sup> Note-se que cabos de alimentação mais longos requerem maior quantidade de energia. Por esta razão, instalações mais longas suportam menor número de sensores. Desta forma, dispositivos digitais permitem maior número de sensores em profundidades equivalentes porque têm menor consumo energético.

A recolha de dados pode ainda ser localizada ou centralizada. A primeira técnica consiste no armazenamento de dados no local de cada instalação inclinométrica, obrigando à existência de uma unidade de armazenamento perto do tubo, no caso de aquisição automática, ou à deslocação de um técnico ao local, caso a recolha de dados seja manual. Em sistemas centralizados, as instalações inclinométricas encontram-se ligadas a uma central de aquisição, podendo o processo de recolha ser manual ou automático.

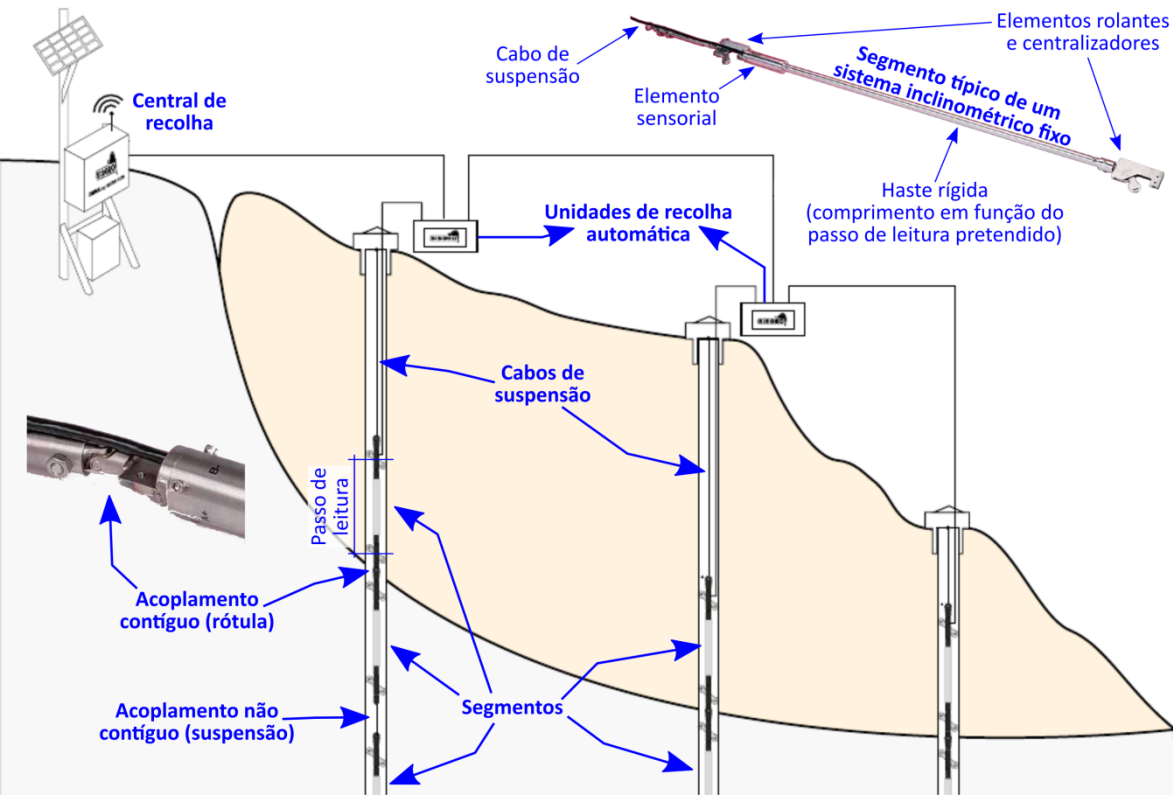


Figura 14 – Exemplo de uma instalação inclinométrica fixa (adaptado de GEOKON, 2017a; SISGEO, 2017a).

No quadro seguinte apresentam-se dois novos sistemas inclinométricos que surgiram durante a última década e que apresentam especificidades próprias.

Quadro 5-1 – Sistemas inclinométricos fixos alternativos aos convencionais – *continua na próxima página.*

Instrumento	Descrição/princípio	Observações comparativamente aos sistemas inclinométricos
<sup>1</sup> DMS	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sequência de secções tubulares rígidas com 30 cm a 1 m de comprimento e unidas por juntas flexíveis em borracha reforçada;</li> <li>sensores inclinométricos do tipo eletrolítico (2.2.2.2; 2.2.5.6);</li> <li>flexibilidade relativamente aos sensores a instalar (in ex.: inclinométricos, extensométricos ou piezométricos);</li> <li>controlo inteiramente remoto;</li> <li>configurações especializadas para cenários específicos<sup>3</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Aplicável em tubagem inclinométrica ou piezométrica;</li> <li>maior dificuldade no alinhamento, já que não tem rodas;</li> <li>centralização e fixação através de centralizadores (DMS 2D) ou de mangas expansíveis (DMS 3D);</li> <li>multiparamétrico (in ex.: observação de deformações bi ou tridimensionais, níveis/pressões de água, vibrações e temperatura numa única instalação);</li> <li>contínuo (in ex.: inflexibilidade no que respeita à observação de apenas algumas zonas de interesse);</li> <li>recuperação potencialmente mais fácil pela ausência de rodas;</li> <li>instalação requer equipamento pesado e especializado;</li> <li>maior investimento inicial;</li> <li>profundidade máxima inferior.</li> </ul>

Quadro 5-2 – Sistemas inclinométricos fixos alternativos aos convencionais – *continuação*.

Instrumento	Descrição/princípio	Observações comparativamente aos sistemas inclinométricos
<sup>2</sup> SAA	<ul style="list-style-type: none"> <li>Sequência de agrupamentos de 8 segmentos rígidos com 30 cm a 1 m de comprimento, interligados por juntas flexíveis;</li> <li>acelerómetros provavelmente do tipo piezoelétrico com deteção da deflexão por capacitância (2.2.5.2)<sup>4</sup>;</li> <li>cada segmento tem a capacidade de medir deformações triaxiais, vibrações e temperatura<sup>5</sup>;</li> <li>controlo local ou remoto;</li> <li>configurações especializadas para cenários específicos<sup>6</sup>.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Instalação em tubo PVC com 25 – 28 mm de diâmetro, o que representa menor custo de perfuração;</li> <li>maior flexibilidade de alinhamento<sup>7</sup>;</li> <li>centralização e fixação por compressão axial dentro do tubo (in ex.: a compressão provoca a expansão lateral das juntas);</li> <li>medição de movimentos laterais, assentamentos e vibrações numa única instalação<sup>5</sup>;</li> <li>contínuo (in ex.: inflexibilidade no que respeita à observação de apenas algumas zonas de interesse);</li> <li>recuperação potencialmente mais fácil pela ausência de rodas;</li> <li>instalação requer equipamento pesado e especializado;</li> <li>mais prático e potencialmente mais económico em situações de uso temporário;</li> <li>profundidade máxima inferior.</li> </ul>

<sup>1</sup>DMS (*differential monitoring of stability*), desenvolvido pela empresa italiana CSG (Centro Servizi di Geoingegneria): Blikra (2008); Falletto et al. (2011); Foglino et al. (2008, 2006); Gardellini & Osimani (2008); Giuffredi et al. (2003); Lovisolo et al. (2007, 2003); Lovisolo & Giusta (2005); Olivieri et al. (2012).

<sup>2</sup>SAA (*shape acceleration array*), desenvolvido conjuntamente pelo Departamento de Transportes do Estado de Nova York (NYSDOT) e pelo Instituto Politécnico de Rensselaer (RPI): Abdoun et al. (2008, 2007); Abdoun & Bennett (in: BiTech, 2008); Barendse (in: BiTech, 2008); Bennett et al. (2007a, 2007b); Danisch et al. (2007, 2005); MEASURAND (2013, 2010).

<sup>3</sup>DMS 2D SLIDE: taludes suscetíveis a roturas frágeis e observação de curto prazo (até 30 m); DMS 2D SLOPE: taludes não suscetíveis a roturas frágeis e observação de médio prazo (até 100 m); DMS 2D LST: taludes não suscetíveis a roturas frágeis e observação de longo prazo (até 250 m); DMS 2D GV: colunas integrais (in ex.: pré-assembladas) para observação de estruturas e de obras geotécnicas em qualquer inclinação (até 100 m); DMS 3D: sistema multiparamétrico com observação tridimensional.

<sup>4</sup>A bibliografia refere a tecnologia MEMS (2.2.5) e a necessidade de proceder a correção térmica automatizada, especificando que o princípio de funcionamento se baseia na deflexão de uma haste siliciosa medida por intermédio de um campo elétrico.

<sup>5</sup>As deformações triaxiais estão limitadas a  $\pm 60^\circ$  relativamente ao plano vertical. Ou seja, o sistema só mede assentamentos e vibrações no plano horizontal.

<sup>6</sup>SAAF: uso generalizado, controlo remoto, medição de deformações em todos os segmentos e de vibrações em algumas secções; SAAR: uso especializado (in ex.: investigação), alta frequência, controlo local, medição de deformações e de vibrações em todos os segmentos.

<sup>7</sup>O sistema permite a definição de qualquer orientação azimutal (in ex.: a rotação do referencial é automatizada), mas o alinhamento físico do equipamento é importante para que os níveis de exatidão e de precisão especificados sejam atingidos.

### 2.4.3. Equipamentos inclinométricos de sonda

Os equipamentos de sonda consistem numa bitola com os respetivos sensores (Figura 37, 4.3.1), um cabo de ligação e de controlo da profundidade (4.5), e elementos rolantes centralizadores (Figura 38, 4.3.1). O tipo de sensor utilizado é normalmente o servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (2.2.4) ou o MEMS capacitivo servoacelerado (2.2.5.4). Ao contrário dos equipamentos fixos, estes têm passo de leitura fixo, normalmente de 0,5 m para o sistema métrico ou de 2 ft (0,61 m) para o sistema anglo-saxónico. São manualmente introduzidos em cada instalação a observar e gradualmente recolhidos da mesma, efetuando-se medições pontuais ao longo do percurso e em função do passo de leitura (4.1). Na Figura 15 apresenta-se um exemplo de um equipamento inclinométrico de sonda.

De um modo geral, cada campanha requer 2 ou 4 passagens da sonda no interior do tubo, conforme o instrumento seja uni ou biaxial, respetivamente (4.1). Este procedimento é necessário para que o cálculo se faça por redundância de leituras simétricas entre si, de forma a eliminar o

erro do desvio na origem (5.1). O processo de redundância não só melhora a repetibilidade do sistema como também permite o aumento dos períodos de serviço entre calibrações, já que o efeito da deriva é efetivamente eliminado, desde que o instrumento opere dentro de determinadas condições (6). A repetibilidade é essencialmente dependente da qualidade e da condição da instalação (3), do sistema de referência utilizado (4.4) e do rigor do operador que executa as campanhas de observação (6). O bom funcionamento deste tipo de equipamento requer também certos cuidados no que respeita ao seu manuseamento, transporte e armazenamento, uma vez que é muito sensível ao choque e propenso a derivas (4), principalmente quando o sensor não é do tipo MEMS (2.2.5).



Figura 15 – Exemplo de um equipamento inclinométrico de sonda (adaptado de SISGEO, 2013a, 2011).

Relativamente aos equipamentos fixos, o inclinómetro de sonda apresenta a vantagem de ser menos suscetível a prisões no interior da instalação por deformação excessiva da mesma, uma vez que: *a)* normalmente é fornecida uma sonda placebo para verificar se o instrumento é capaz de transitar no interior da instalação, como também *b)* é raro que uma sonda consiga transitar no sentido descendente e seja incapaz de ascender novamente ao topo do tubo.

Dependendo do comprimento do respetivo cabo, os equipamentos de sonda são relativamente fáceis de transportar, havendo variantes de cabo permanentemente fixo à sonda (in ex.: SOIL, 2014c) ou destacável (in ex.: GEOKON, 2016b), podendo este ser fornecido em bobina ou solto. As unidades de aquisição mais recentes equivalem a *smartphones* ou *iPads* comuns com transmissão de dados *wireless*, havendo mesmo sistemas que fornecem *software* passível de ser instalado em qualquer telemóvel moderno (in ex.: ENCARDIO, 2017). Contudo, os sistemas com este tipo de unidade de aquisição requerem a utilização de um cabo em bobina para alojamento das unidades de alimentação energética e de transmissão de dados da sonda inclinométrica. Importa frisar que um cabo solto é potencialmente mais fácil de transportar em situações de difícil acesso, mesmo



considerando a perda de peso significativa de que os cabos em bobina beneficiaram durante a última década. Importa ainda referir outras considerações a fazer no que respeita à aquisição de *i)* sistemas de cabo destacável ou *ii)* permanentemente fixo à sonda:

- os sistemas do tipo *i)* permitem o transporte acondicionado, mesmo em situações de acesso dificultado (in ex.: impossibilidade de transporte rodoviário);
- os sistemas do tipo *i)* permitem a substituição do instrumento utilizado numa determinada instalação, mantendo o cabo de ligação e de controlo da profundidade<sup>1</sup>;
- os sistemas do tipo *i)* permitem a manutenção independente da sonda e do respetivo cabo de ligação e de controlo da profundidade;
- os sistemas do tipo *i)* requerem cuidados e manutenção adicionais da ficha de ligação da sonda ao cabo (4.3; 4.5). Por isso, são mais propensos a avarias derivadas de falhas associadas à ficha, seja por danos causados pela tensão a que a mesma está sujeita, seja por desgaste e/ou falta de manutenção dos respetivos vedantes.

Há também uma sonda inclinométrica triaxial comercializada sob o nome TRIVEC pela empresa Solexperts AG (Dunnicliff, 1988; Frodl, 2000; Frodl & Naterop, 2007; Naterop, 1998; SOLEXPERTS, 2017; Thut, 1999). O equipamento TRIVEC consiste numa sonda telescópica com 1 m de comprimento e um sistema de acoplamento do tipo *cónico-esférico* em ambas as extremidades. A instalação requer tubos telescópicos especiais com pontos de acoplamento ao longo do eixo. O equipamento é guiado através de um dispositivo especializado que permite a sua rotação, de forma a garantir o correto acoplamento das duas extremidades da sonda em cada par de pontos sequenciais ao longo do tubo. A distância entre os dois pontos de acoplamento é medida através de um transdutor de deslocamento linear de alta precisão<sup>2</sup>. A medição dos deslocamentos transversais faz-se por intermédio de MEMS acelerométricos capacitivos (2.2.5.4). A medição dos deslocamentos axiais não depende da inclinação do tubo, mas os sensores acelerométricos estão limitados a uma amplitude de  $\pm 10^\circ$ . O sistema requer calibração antes e depois de cada campanha de observação, sendo a duração das campanhas potencialmente mais elevada devido à forma como o equipamento é operado. A principal aplicação do TRIVEC é em obras que requerem a observação de assentamentos com uma precisão muito elevada (in ex.: barragens hidroelétricas), sendo preferível associar equipamentos inclinométricos e extensométricos portáteis na maioria das situações que requeiram acompanhamento das deformações internas.

---

<sup>1</sup> Note-se que a substituição do cabo num sistema inclinométrico pode introduzir erros de profundidade difíceis de corrigir (6.4.4), sendo este risco agravado com o aumento da idade e da fadiga do cabo substituído.

<sup>2</sup> SOLEXPERTS (2017) refere a medição de deslocamentos axiais com exatidão  $\pm 0,002 \text{ mm}$  e resolução  $0,001 \text{ mm}$ .

### 3. INSTALAÇÕES INCLINOMÉTRICAS

#### 3.1. Considerações iniciais

Uma instalação inclinométrica caracteriza-se por um tubo inclinométrico<sup>1</sup> e um meio de ligação à estrutura sob observação. A eficácia de uma instalação inclinométrica depende essencialmente:

- a) da capacidade que o meio de ligação tem de transferir para o tubo as deformações sofridas pela estrutura observada;
- b) das condições de integridade estrutural do tubo inclinométrico<sup>2</sup>.

O fator *a)* relaciona-se diretamente com os procedimentos de execução da instalação. Nas secções 3.3 a 3.7 discutem-se procedimentos adequados aos seguintes tipos de instalação:

- por acoplamento exterior (3.3);
- em furo de sondagem (3.4);
- em aterro (3.5; 3.6);
- em vala ou em trincheira (3.7).

O fator *b)* prende-se com o perfil de deformação desenvolvido e com a existência de condições locais propícias à corrosão do tubo (in ex.: águas alcalinas e/ou temperaturas muito elevadas). O perfil de deformação deve ser acompanhado tendo em vista a capacidade da(s) sonda(s) circular(em) livremente no interior do tubo (5.8.3). Sempre que haja a perspectiva de ocorrerem deslocamentos que impliquem a interrupção do programa de observação, ou a perda de instrumentos, deve existir um plano de contingência para a execução atempada de novas instalações nas zonas de observação afetadas, ou para a adoção de medidas que permitam a extensão da longevidade das instalações em causa<sup>3</sup>. Na secção 3.2 apresentam-se vários tipos de tubo disponíveis no mercado e discutem-se os respetivos âmbitos de aplicação.

#### 3.2. Tubos inclinométricos

##### 3.2.1. Classificação, caracterização, aquisição e armazenamento de tubos inclinométricos

A classificação de tubos inclinométricos pode fazer-se em função:

- a) do material de construção (3.2.2);
- b) do diâmetro interno (3.2.3);
- c) do tipo de união entre troços (3.2.4).

---

<sup>1</sup> Também designado por tubo-calha.

<sup>2</sup> Por exemplo, existência de zonas de rotura e/ou afetadas por fenómenos de corrosão.

<sup>3</sup> A longevidade dos tubos inclinométricos pode ser estendida por instalação de cabos coaxiais ou de fibra ótica (Quadro 2, 1.3).

Este tipo de tubo caracteriza-se pela inclusão de quatro calhas de rodagem que definem dois planos ortogonais (Figura 16). É geralmente fornecido em troços individuais com 1,5 m, 3 m ou 6 m de comprimento, em função da sua aplicação e da capacidade de transporte disponível. Os troços podem ser cortados para facilitar as operações de instalação<sup>1</sup>. No entanto, à exceção do troço mais superficial, convém que os troços de determinada instalação tenham todos o mesmo comprimento para facilitar o despiste de incoerências nos dados inclinométricos (6.4.7).

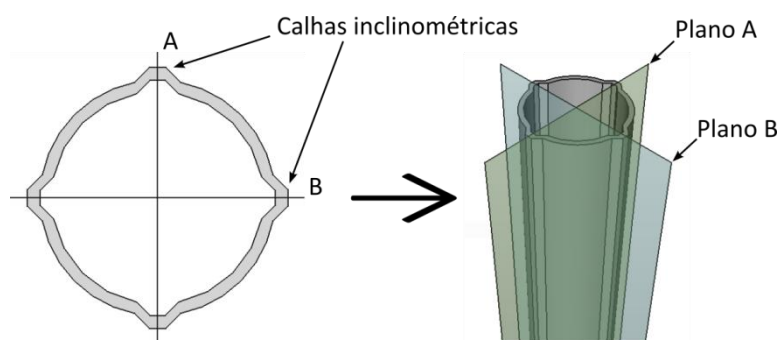


Figura 16 – Calhas inclinométricas e planos ortogonais correspondentes (adaptado de Coimbra, 2016).

O fabrico de tubos inclinométricos pode ser encomendado à indústria de alumínios ou de polímeros, mediante uma especificação geométrica, sem esquecer alguns requisitos fundamentais, tais como a resistência à corrosão e o desvio máximo no alinhamento axial das calhas inclinométricas (Quadro 6, 3.2.2; Figura 18, 3.2.3; Figura 23, 3.4.4). Embora hajam fabricantes de tubagens generalizadas que comercializam este tipo de tubo, o mercado é predominantemente detido pelos fabricantes de inclinómetros. O fornecedor apropriado dependerá da localização geográfica, do custo/metro, da quantidade necessária e da adequabilidade da oferta às exigências do projeto.

O armazenamento de tubos inclinométricos deve fazer-se em ambiente seco, sem grandes variações térmicas e com as suas extremidades fechadas. Por um lado, as variações térmicas bruscas e significativas<sup>2</sup> induzem deformações importantes nos tubos inclinométricos, principalmente ao nível do alinhamento das calhas de rodagem (Figura 24, 3.4.5; Coimbra, 2016; Dunnicliff, 1988). Por outro lado, os tubos armazenados são propensos à acumulação de sujidade nas calhas inclinométricas<sup>3</sup>, o que dificulta a circulação das sondas inclinométricas e afeta a qualidade metrológica dos dados respetivos (6; Coimbra, 2016; Dunnicliff, 1988).

### 3.2.2. Material de construção dos tubos inclinométricos

Os tubos inclinométricos podem ser fabricados em alumínio, aço, fibra de vidro, ou plástico<sup>4</sup>. De-

<sup>1</sup> O corte do tubo obriga ao uso de uniões exteriores ou telescópicas para a ligação de troços contíguos (3.2.4).

<sup>2</sup> Por exemplo, incidência direta de luz solar.

<sup>3</sup> Por exemplo, causada por pequenos animais, tais como mamíferos, répteis, insetos ou pássaros.

<sup>4</sup> Normalmente em PVC (policloreto de vinil) ou em ABS (acrilonitrila-butadieno-estireno).

pendendo do material de construção, a espessura pode variar 2 – 6 mm. No Quadro 6 identificam-se as principais características dos diferentes tipos de tubo disponíveis no mercado.

Quadro 6 – Principais características dos diferentes tipos de tubo inclinométrico disponíveis (adaptado de Coimbra, 2016; DGSI, 2013b; DSERVICE, 2017a; Dunnicliff, 1988; GEOKON, 2017b; RST, 2017; SISGEO, 2016a, 2016b, 2016c, 2010).

Material	Características gerais e observações
Alumínio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro interno: 49 – 76 mm.</li> <li>• Espessura: 1,8 – 2,4 mm.</li> <li>• Exige um tratamento anticorrosão.</li> <li>• Resistência à corrosão aceitável, exceto em ambientes que contenham água alcalina (in ex.: <math>pH \geq 9</math>).</li> <li>• Preço por metro superior ao dos tubos plásticos. Contudo, requer a aquisição de menor quantidade, podendo resultar num investimento inicial inferior em obras de pequena dimensão.</li> <li>• Bom controlo do alinhamento axial das calhas inclinométricas durante o fabrico. Contudo, deve ser armazenado em temperaturas moderadas e sem exposição solar.</li> <li>• Aplicável em praticamente todos os casos de obra, exceto quando a água é alcalina (in ex.: <math>pH \geq 9</math>) ou quando há temperaturas muito elevadas no ambiente subterrâneo.</li> </ul>
Aço	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Consiste num perfil fechado, oco e de secção quadrada.</li> <li>• Diâmetro interno: <math>\varnothing \geq 44</math> mm.</li> <li>• Espessura: <math>e \cong 3</math> mm.</li> <li>• Muito pouco utilizado. Constitui uma solução barata para instrumentar fundações profundas ou outro tipo de estruturas que permitam deformações transversais apreciáveis e cujo módulo de deformação seja conhecido (in ex.: perfis de aço cravados ou soldados).</li> <li>• Precisão dos resultados inferior à obtida a partir de tubos inclinométricos.</li> <li>• Fraca resistência à corrosão. Exige tratamento anticorrosão na presença de água.</li> <li>• Torção e alinhamento axial difíceis de controlar.</li> </ul>
Fibra de vidro	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro interno: 60 – 70 mm.</li> <li>• Espessura: 2 – 3 mm.</li> <li>• Preço por metro superior ao dos tubos plásticos.</li> <li>• Excelente resistência à corrosão.</li> <li>• Bom controlo do alinhamento axial das calhas inclinométricas durante o fabrico e sem suscetibilidade de se deformar por exposição solar.</li> <li>• Pouco utilizado. Aplicável em todos os casos de obra. Contudo, só se justifica na presença de águas extremamente agressivas ou com temperatura superior a 60 °C.</li> </ul>
Plástico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Diâmetro interno: 40 – 75 mm.</li> <li>• Espessura: 5 – 6 mm.</li> <li>• Utilizado com maior frequência. O tubo em ABS tem-se substituído aos tubos em PVC e em alumínio.</li> <li>• Preço por metro é inferior ao dos tubos de alumínio. Contudo, requer a aquisição de maior quantidade, podendo resultar num investimento inicial superior em obras de pequena dimensão.</li> <li>• Boa resistência à corrosão.</li> <li>• Bom controlo do alinhamento axial das calhas inclinométricas durante o fabrico. Contudo, deve ser armazenado em temperaturas moderadas e sem exposição solar.</li> <li>• Aplicável em praticamente todos os casos de obra, exceto na presença de água extremamente agressiva ou com temperatura superior a 60 °C.</li> </ul>

Os tubos plásticos e de alumínio são os que apresentam maior versatilidade, sendo por isso mais

frequentemente utilizados. Os tubos plásticos em ABS são normalmente indicados pelos fabricantes, pelo que têm tido maior aplicação que os de alumínio. No entanto, convém notar que:

- a quantidade mínima de aquisição é normalmente superior para tubos plásticos<sup>1</sup>;
- o tipo de união plástica pode influenciar o desempenho do tubo plástico respetivo<sup>2</sup>;
- as calhas de rotação nem sempre são biseladas<sup>3</sup> (Figura 17);
- o erro do alinhamento axial das calhas pode ser superior em tubos plásticos<sup>4</sup>.

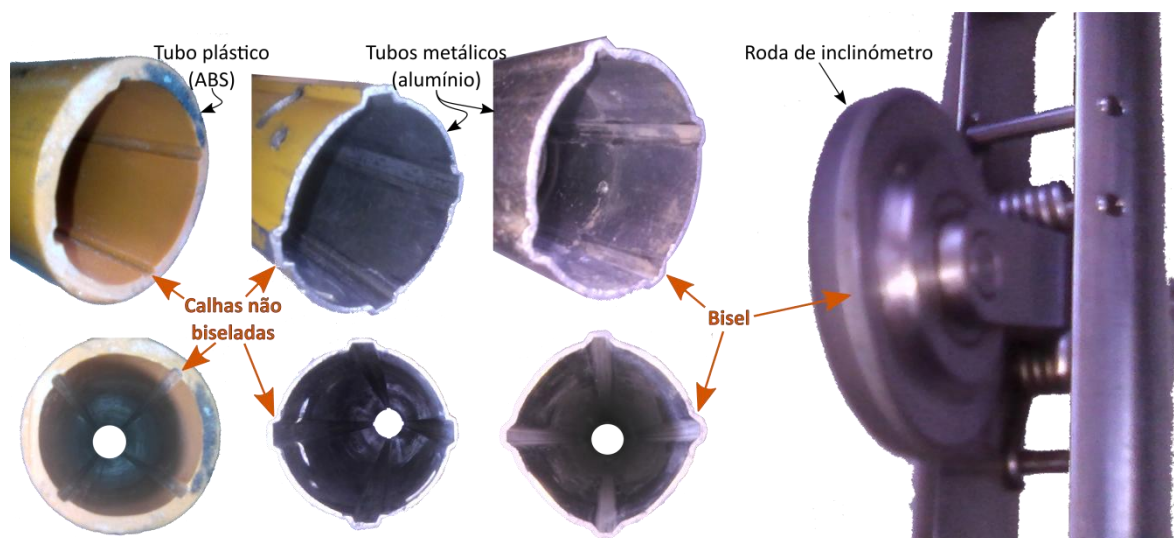


Figura 17 – Exemplos da existência ou ausência de bisel em calhas e em rodas inclinométricas.

### 3.2.3. Diâmetro interno dos tubos inclinométricos

Os tubos inclinométricos são normalmente fornecidos em três diâmetros distintos que podem variar 50 – 80 mm (Quadro 6, 3.2.2). Por um lado, o diâmetro do tubo limita a circulação da sonda inclinométrica no seu interior em zonas com deformação acentuada, estando diretamente relacionado com o deslocamento máximo mensurável<sup>5</sup> (5.8.3). Por outro lado, o diâmetro do tubo deve ser adequado ao diâmetro do furo onde é instalado (3.4.2), sendo este frequentemente definido em função do tipo de terreno a perfurar e/ou do equipamento de perfuração disponível.

Na Figura 18 apresenta-se um esquema geométrico dos tubos de alumínio mais frequentemente comercializados. O esquema geométrico para tubos plásticos pode variar consideravelmente em função do fabricante. Alguns exemplos encontram-se em DSERVICE (2017a), RST (2017), SINCO

<sup>1</sup> Pode implicar um investimento desproporcional às necessidades, pelo que os tubos de alumínio, quando aplicáveis (Quadro 6), devem ser considerados em obras de pequena dimensão.

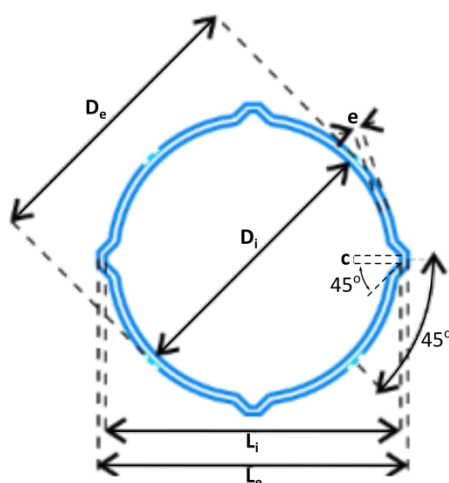
<sup>2</sup> Uniões integrais têm menor resistência e podem induzir a interrupção prematura dos tubos (3.2.4). A informação sobre as características mecânicas das uniões deve solicitar-se aos fabricantes e analisar-se comparativamente aos vários fornecedores disponíveis.

<sup>3</sup> Tanto as calhas de rotação como as rodas do instrumento devem ser biseladas a fim de dificultar o desenclhamento das rodas em zonas de deformação localizada do tubo e/ou na presença de detritos.

<sup>4</sup> As calhas inclinométricas dos tubos plásticos podem produzir-se durante o processo de extrusão do tubo ou, *à posteriori*, por maquinaria. O primeiro método é mais barato, mas o segundo oferece melhor controlo sobre o alinhamento axial das calhas. Note-se que o erro de alinhamento axial dos acelerómetros inclinométricos é normalmente inferior a 0,5° (Dunncliff, 1988; Mikkelsen, 2003), devendo-se procurar tubos que ofereçam esse grau de precisão no que respeita ao alinhamento axial das calhas de rotação.

<sup>5</sup> Ou seja, a seleção do diâmetro de tubo deve considerar a magnitude de deslocamento esperada.

(2013b) e SISGEO (2016a, 2016b, 2016c). Exemplos da geometria de tubos em fibra de vidro encontram-se em GEOKON (2017b) e SISGEO (2010).



Tubo:	Estreito	Médio	Largo
Diâmetro interno ( $D_i$ , mm):	48,85	56,75	75,95
Diâmetro externo ( $D_e$ , mm):	52,45	60,75	80,75
Largura interna ( $L_i$ , mm):	54,15	62,65	80,20
Largura externa ( $L_e$ , mm):	57,75	66,65	85,00
Espessura ( $e$ , mm):	1,8	2,0	2,4
Calha ( $c$ , mm):	3,4	3,4	3,4

União:	Estreita	Média	Larga
Diâmetro interno ( $D_i$ , mm):	57,25	61,85	82,50
Diâmetro externo ( $D_e$ , mm):	60,85	65,85	87,30
Largura interna ( $L_i$ , mm):	63,50	67,85	87,30
Largura externa ( $L_e$ , mm):	67,10	71,85	92,10
Espessura ( $e$ , mm):	1,8	2,0	2,4
Calha ( $c$ , mm):	3,9	3,9	3,9

Figura 18 – Especificação geométrica para tubos de alumínio (adaptado de Coimbra, 2016; DSERVICE, 2017b; Nunes & Sousa, 1986).

### 3.2.4. Tipo de união entre troços de tubo inclinométrico

As uniões entre troços de tubo inclinométrico podem ser exteriores, integrais ou telescópicas (Figura 19).

As uniões exteriores (Figura 19a) aplicam-se a qualquer tipo de tubo. Consistem em troços de tubo curtos e mais largos que os troços principais. São fixadas a dois troços de tubo de forma a uni-los para constituir um tubo contínuo. A fixação das uniões pode fazer-se por intermédio de rebites<sup>1</sup>, encaixe<sup>2</sup> e/ou colagem<sup>3</sup>.

As uniões integrais (Figura 19b) aplicam-se apenas a tubos plásticos. O troços de tubo encaixam-se diretamente entre si através de uma ficha pré-fabricada do tipo macho-fêmea. A resistência da ligação entre troços é menor<sup>4</sup> da obtida com uniões exteriores ou telescópicas, havendo maior suscetibilidade para a acumulação de tensões em situações de deformação localizada numa secção muito curta e, consequentemente, para a inutilização precoce do tubo.

As uniões telescópicas (Figura 19c) aplicam-se a qualquer tipo de tubo. Permitem que os troços principais de tubo deslizem no seu interior, ou possuem uma secção exterior e duas secções con-

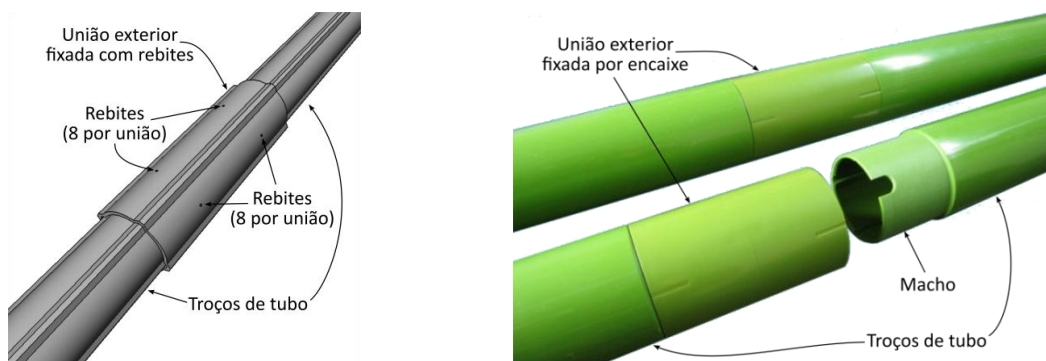
<sup>1</sup> Aplica-se a tubos metálicos ou plásticos sem fixação por encaixe.

<sup>2</sup> Aplica-se a tubos plásticos com terminação do tipo macho-fêmea.

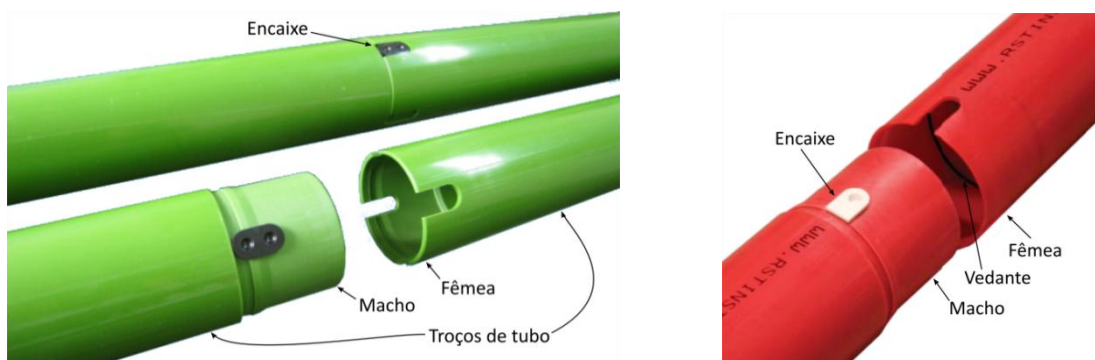
<sup>3</sup> A colagem é normalmente aplicada em todas as uniões com o objetivo de impermeabilizar o tubo durante a instalação (3.4.4). No entanto, há também fabricantes de tubos plásticos com uniões exteriores planas (in ex.: sem encaixe macho-fêmea) que indicam a colagem como método preferencial de assemblagem (in ex.: DGSI, 2013b; RST, 2017; SISGEO, 2016b).

<sup>4</sup> Note-se que os fabricantes só fornecem a resistência das uniões à tração. Esta informação é útil relativamente à resistência que as mesmas oferecem durante a instalação do tubo, uma vez que têm de suportar o peso de todas as secções inferiores em suspensão. No entanto, a informação sobre a resistência à tração das uniões é insuficiente no que respeita à manutenção da sua integridade sob ações de corte ou de flexão constrita. Nesta condição, as uniões exteriores oferecem maior resistência porque tanto a espessura de tubo como o comprimento de tubo sobreposto na zona da união são superiores.

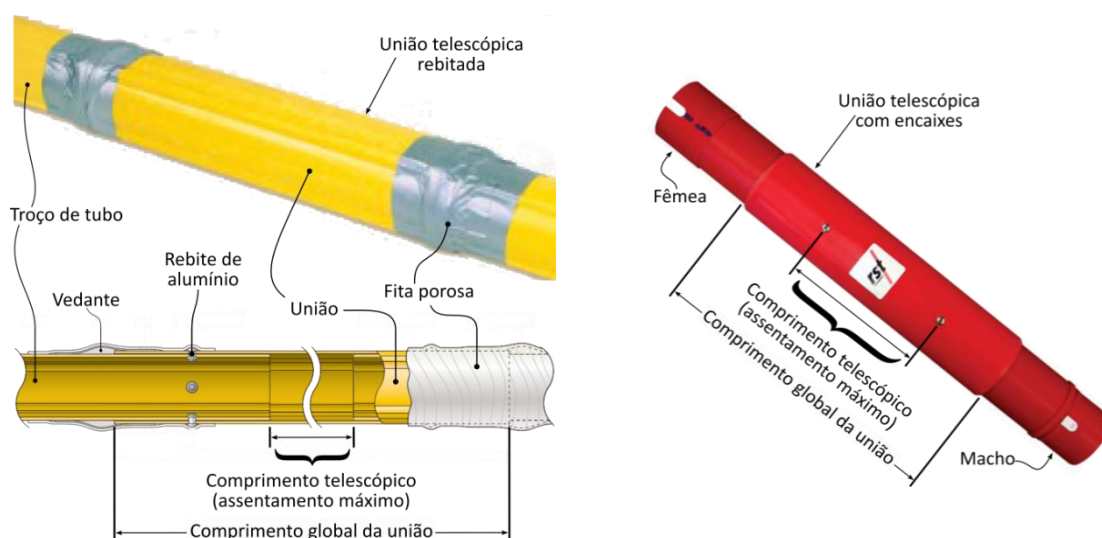
tútuas interiores, de forma a que as segundas deslizem no interior da primeira. Podem ser utilizadas juntamente com um sistema para medição das deformações na direção longitudinal da instalação inclinométrica (3.6). Este tipo de união deve utilizar-se em instalações verticais onde se preveja a ocorrência de assentamentos com magnitude igual ou superior a 1% da profundidade considerada compressível (Dunnicliff, 1988).



a) *Uniões exteriores.*



b) *Uniões integrais.*



c) *Uniões telescópicas.*

Figura 19 – Tipos de união entre troços de tubo inclinométrico (adaptado de ACE, 2017; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017b; RST, 2017).

### 3.3. Instalações por acoplamento exterior ou por incorporação estrutural

Este tipo de instalação consiste *a)* no acoplamento do tubo inclinométrico no exterior da estrutura a observar, ou *b)* na incorporação do tubo no interior da mesma<sup>1</sup>.

No primeiro caso o tubo é fixo à estrutura em pontos com um determinado espaçamento entre si. A fixação do tubo pode fazer-se por intermédio de abraçadeiras aparafusadas ou soldadas, ou, no caso de tubos de aço com secção quadrada, por soldagem direta do tubo inclinométrico. Este método é desaconselhado pelas seguintes razões:

- o tubo fica exposto à radiação solar e a ações de vandalismo<sup>2</sup>;
- a ligação do tubo à estrutura é descontínua<sup>3</sup>.

A instalação do tipo *b)* caracteriza-se pela inclusão do tubo no interior de uma estrutura de betão. A instalação pode fazer-se de duas formas distintas:

- inclusão de um tubo de aço no interior da estrutura durante a sua construção e posterior instalação do tubo inclinométrico no interior do tubo incluso;
- perfuração da estrutura após a sua construção e instalação do tubo no interior do furo.

Instalações deste tipo adequam-se especialmente a fundações profundas. O primeiro método é preferível porque dispensa os custos de perfuração. O segundo método constitui a única opção quando é necessário proceder à observação inclinométrica no decurso do tempo de serviço da estrutura. Em ambos os casos deve proceder-se ao preenchimento do espaço anelar com calda, seguido as indicações gerais descritas em 3.4.7.

Ambos os tipos de instalação *a)* e *b)* são pouco comuns, uma vez que há outros métodos de observação mais apropriados a estruturas<sup>4</sup>, são comparativamente mais dispendiosas, exigem acesso constante ao tubo inclinométrico e, no caso *a)*, obriga à exposição do tubo. Exemplos e sugestões de aplicação encontram-se em Dunnicliff (1988), GEOI (2017), Karim (2013), Lin et al. (2005), Machan & Bennett (2008), Segura-Castillo et al. (2013), SOIL (2014b) e Talmon & Bezuijen (2013).

### 3.4. Instalações em furo de sondagem

#### 3.4.1. Sequência de procedimentos e condicionantes ao desempenho das instalações

Este é o tipo de instalação inclinométrica mais frequentemente executada. De um modo geral, a

<sup>1</sup> Por exemplo, um pilar, fundação, estrutura de suporte ou talude/encosta rochoso(a).

<sup>2</sup> O uso de um tubo de aço com secção quadrada (Quadro 6, 3.2.2) ou a instalação do tubo inclinométrico no interior de um tubo de aço pode minorar estes inconvenientes. No último caso deve proceder-se ao enchimento do espaço anelar com calda, seguido as indicações gerais descritas em 3.4.7.

<sup>3</sup> As deformações entre os pontos de fixação podem ser detetadas tardiamente, pelo que este método só é aplicável em situações onde ocorram deformações distribuídas ao longo da instalação inclinométrica.

<sup>4</sup> Por exemplo, cabos de fibra ótica, clinómetros, extensómetros, fissurómetros, alvos topográficos, entre outros (in ex.: 1.3).



sequência de procedimentos aplicada é a seguinte:

1. Perfuração do terreno até à profundidade adequada.
2. Limpeza do furo de sondagem.
3. Obturação e selagem do fundo do tubo inclinométrico.
4. Montagem do tubo e selagem das respectivas uniões, anteriormente ou durante a sua introdução no interior do furo.
5. Alinhamento das calhas inclinométricas durante e após a introdução do tubo no interior do furo de sondagem.
6. Encastramento do tubo inclinométrico.
7. Enchimento do espaço anelar entre o tubo e o furo.
8. Proteção do topo do tubo, identificação da instalação e identificação da calha correspondente ao sentido principal.

O desempenho numa instalação inclinométrica deste tipo depende fundamentalmente:

- da relação entre os diâmetros do tubo e do furo (3.4.2);
- do comprimento do furo (3.4.3);
- da verticalidade e da limpeza do furo<sup>1,2</sup>;
- da correta união e selagem dos troços de tubo (3.4.4);
- do alinhamento das calhas inclinométricas (3.4.5);
- da qualidade do maciço de encastramento (3.4.6);
- da adequabilidade e qualidade do preenchimento do espaço anelar (3.4.7).

Para além dos fatores de desempenho acima referidos, deve procurar-se que os deslocamentos se desenvolvam num plano aproximadamente perpendicular ao eixo do tubo, de forma a evitar-se a ocorrência de deformações axiais consideráveis em instalações que não incorporem uniões telescópicas (3.6). Pois, os esforços induzidos pelas deformações paralelas ao eixo do tubo podem provocar a rotura das uniões e o posterior esmagamento do tubo, inviabilizando a instalação prematuramente. Ademais, os deslocamentos medidos só exprimem a magnitude total da deformação do terreno quando tomam uma direção perpendicular ao eixo do tubo.

### **3.4.2. Diâmetro do furo de sondagem**

O diâmetro do furo de sondagem deve ser adequado ao diâmetro do tubo. Por um lado, diâmetros de furo excessivos levam a maior consumo de material de enchimento e potenciam o aumento do desfasamento temporal entre a primeira ocorrência de deformações no terreno e a sua tradução em deformações do tubo inclinométrico. Por outro lado, é necessário que haja espaço

---

<sup>1</sup> É importante que a inclinação do furo seja tão próxima do plano de referência do inclinómetro quanto possível, já que a exatidão e a repetibilidade dos sensores diminui em função do aumento da inclinação relativamente ao plano de referência (6.2.1).

<sup>2</sup> A limpeza do furo é importante para assegurar a profundidade pretendida (3.4.3), para assegurar a qualidade do maciço de encastramento (3.4.6) e para reduzir o potencial de migração de partículas sólidas para o interior do tubo durante os procedimentos de encastramento e de preenchimento do espaço anelar (3.4.4).

adequado ao preenchimento total do volume anelar (3.4.7). Tal como referido em 3.2.3, o diâmetro do tubo deve escolher-se em função da magnitude dos deslocamentos esperados, pelo que é normalmente pré-definido pelo projetista. No entanto, é muitas vezes o diâmetro do furo que dita o diâmetro do tubo a instalar, seja por via do tipo de terreno a perfurar ou do equipamento de perfuração disponível. No Quadro 7 apresentam-se valores indicativos dos diâmetros de furo mais adequados aos três diâmetros de tubo mais utilizados (Figura 18, 3.2.3).

Quadro 7 – Diâmetros de furo adequados a diferentes tamanhos de tubo (adaptado de Coimbra, 2016).

Tubo (Figura 18, 3.2.3):	Estreito	Médio	Largo
Diâmetro do furo de sondagem (mm):	80 a 100	100 a 120	120 a 140
<sup>1</sup> Espaço anelar nos troços de tubo (mm):	27,55 a 47,55	39,25 a 59,25	39,25 a 59,25
<sup>1</sup> Espaço anelar nas uniões (mm):	19,15 a 39,15	34,15 a 54,15	32,70 a 52,70

<sup>1</sup>O espaço anelar é relativo ao diâmetro externo do tubo ( $D_e$ ) e não à largura máxima na zona das respetivas calhas ( $L_e$ ).

### 3.4.3. Comprimento do furo de sondagem

O comprimento do furo de sondagem deve permitir:

- o cruzamento de todas as zonas potencialmente instáveis;
- o encastramento do tubo numa zona considerada estável (3.4.6).

Todos os furos de sondagem devem ser acompanhados de um registo litológico. Este procedimento permitirá relacionar os deslocamentos registados com a ocorrência de determinados estratos, ou transições de estrato, e, assim, ajudar a identificar zonas de potencial perda de estabilidade. Contudo, o registo litológico não dispensa os ensaios de caracterização física e mecânica necessários para modelar o comportamento do terreno, sejam estes executados *in situ*<sup>1</sup> ou em laboratório<sup>2</sup>. O registo litológico e os resultados dos ensaios de caracterização são da maior importância para a correta definição da profundidade de uma instalação inclinométrica, exceto quando o solo é relativamente homogéneo e a superfície de deslizamento provável é facilmente identificável.

Após a identificação de uma zona estável em profundidade, a instalação inclinométrica deve ser dimensionada de forma a penetrar nessa zona 2,5 – 5 m (3.4.6; 4.7.2). Se possível, podem ainda tomar-se precauções adicionais no sentido de evitar a interrupção prematura da instalação por deformação localizada em zonas de fraqueza do tubo, como seja o dimensionamento da instalação de forma a assegurar algum desfasamento (in ex.:  $\geq 0,5$  m) entre uma superfície de deslizamento potencial e uma união entre troços de tubo (Coimbra, 2016).

<sup>1</sup> Por exemplo, ensaios do tipo *standard penetration test* (SPT), *cone penetration test* (CPT) ou de molinete (*vane test*).

<sup>2</sup> Por exemplo, a caracterização granulométrica, limites de consistência e peso específico dos grãos, assim como a caracterização da deformabilidade e resistência ao corte (in ex.: ensaio de corte simples – *simple shear test* – ou ensaio triaxial – *triaxial test*).

### 3.4.4. Montagem do tubo inclinométrico e respetiva introdução no furo de sondagem

A montagem do tubo inclinométrico compreende *a)* a obturação e a selagem do fundo do tubo, e *b)* a união e a selagem dos troços de tubo. Estes procedimentos impedem a percolação da calda de encastramento, de partículas finas de solo ou de agregado para o interior do tubo.

A obturação e a selagem do fundo do tubo pode fazer-se recorrendo a uma peça de alumínio moldada<sup>1</sup> ou a qualquer outro acessório fornecido pelo fabricante e apropriado ao modelo de tubo especificamente utilizado (Figura 20).



Figura 20 – Acessórios de obturação do fundo do tubo inclinométrico (adaptado de ACE, 2016a; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017c; HOLE, 2017; TECON, 2017).

A união de troços faz-se por rebitagem e/ou por encaixe (3.2.4). Independentemente da possibilidade de montagem por encaixe, a rebitagem é requerida sempre que o peso do próprio do tubo possa levar as uniões à rotura (in ex.: em instalações muito profundas). Neste sentido, o planeamento da execução de uma instalação deve sempre considerar a informação disponibilizada pela fabricante/fornecedor da tubagem sobre a resistência à tração das respetivas uniões.

A selagem do fundo do tubo e das uniões entre troços depende da necessidade de utilizar o tubo para medição do nível de água. Havendo essa necessidade, a selagem faz-se com recurso a fita-cola porosa<sup>2,3</sup>. Caso contrário é normalmente aplicado um vedante<sup>4</sup> envolvido por fita-cola (Figura 21). Quando os tubos plásticos contêm anel vedante (*o-ring*), a necessidade de se proceder à se-

<sup>1</sup> Aplicável a tubos de alumínio (3.2.2), podendo constituir-se pela moldagem do próprio tubo.

<sup>2</sup> Note-se que neste caso é também necessário proceder ao preenchimento do espaço anelar com material poroso (3.4.7).

<sup>3</sup> Note-se que na presença de aquíferos confinados é necessário proceder ao isolamento do tubo na zona de onde não se pretende obter a informação piezométrica.

<sup>4</sup> Por exemplo, resina do tipo *mastik*, silicone ou outro tipo de cola. Em tubos plásticos pode haver necessidade de aplicação prévia de um diluente para promover a aderência do vedante.

lagem com um vedante adicional depende da pressão a que o tubo esteja sujeito durante o processo de encastramento e de enchimento do espaço anelar (3.4.6; 3.4.7), devendo-se seguir as indicações do fornecedor/fabricante neste sentido.

A montagem do tubo é normalmente executada de forma faseada, à medida que o mesmo é introduzido no furo de sondagem (Figura 22a). Este método implica que o tubo seja manualmente descido e que permaneça suspenso durante a montagem de cada secção. Quando o comprimento do tubo o torna demasiadamente pesado para ser manuseado com segurança, pode proceder-se à sua montagem integral fora do furo e recorrer a uma grua para o elevar e introduzir dentro do furo (Figura 22b). O recurso ao segundo método é pouco frequente.



Figura 21 – Procedimentos de obturação e selagem do fundo e das uniões do tubo inclinométrico (adaptado de Coimbra, 2016; SISGEO, 2016d).

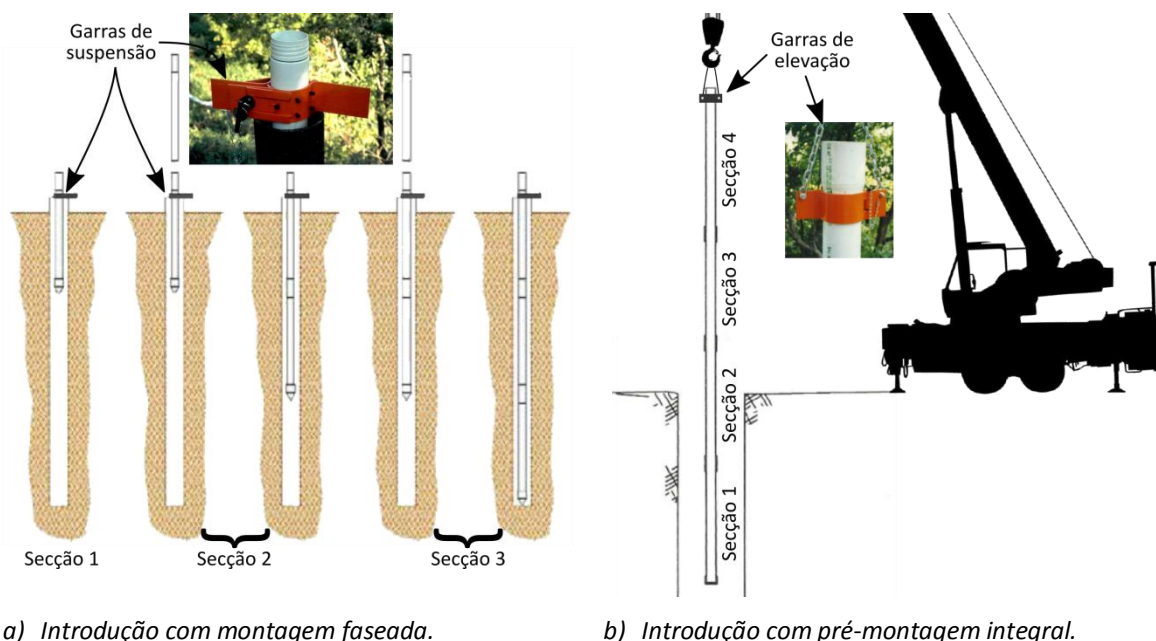


Figura 22 – Introdução do tubo inclinométrico no furo de sondagem (adaptado de ACE, 2016a; Coimbra, 2016; GEOKON, 2017c; HOLE, 2017; SISGEO, 2016d; TECON, 2017).

Deve também atender-se à existência de torção visível nas calhas de rodagem. Pois, a torção contínua das calhas obrigará ao uso de uma sonda especializada para medir a rotação azimutal ao longo do tubo e permitir a correção deste efeito durante o processamento de dados (6.4.6). Dun-

nicliff (1988) refere que a torção contínua das calhas de rotação pode ser minimizada mediante a instalação de troços de tubo contíguos com orientações torcionais contrárias (Figura 23). No entanto, esta prática não se substitui a procedimentos adequados de armazenamento (3.2) e de encastamento (3.4.6), já que a torção das calhas difere entre troços, dependendo tanto do comprimento de cada troço como da exposição a condições indutoras de deformações axiais.

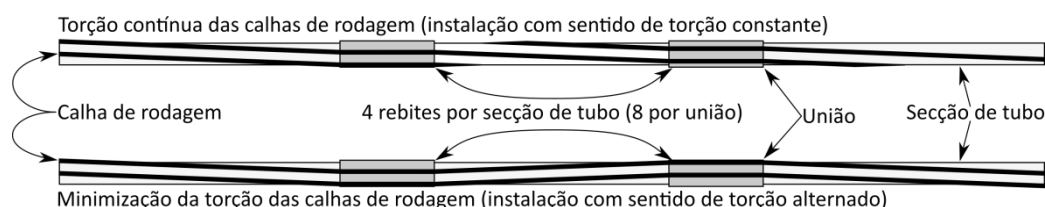


Figura 23 – Técnica de montagem referida por Dunnicliff (1988) para minimizar a torção contínua das calhas de rotação ao longo do tubo.

### 3.4.5. Alinhamento das calhas inclinométricas

O tubo inclinométrico contém quatro calhas de rotação que definem dois planos (Figura 16, 3.2.1). O melhor desempenho consegue-se quando um destes planos se alinha com a direção onde se desenvolvem os deslocamentos<sup>1</sup>. Portanto, o alinhamento das calhas inclinométricas é da maior importância, já que a repetibilidade do sistema não é igual em todas as direções, sendo, no caso de instrumentos biaxiais, superior no plano onde as rodas da sonda circulam (6.2).

A direção  $A^1$  pode definir-se em função de observações ou indícios detetados *in situ*, ou em função da direção de maior declive e de resultados obtidos de um modelo matemático (Figura 24).

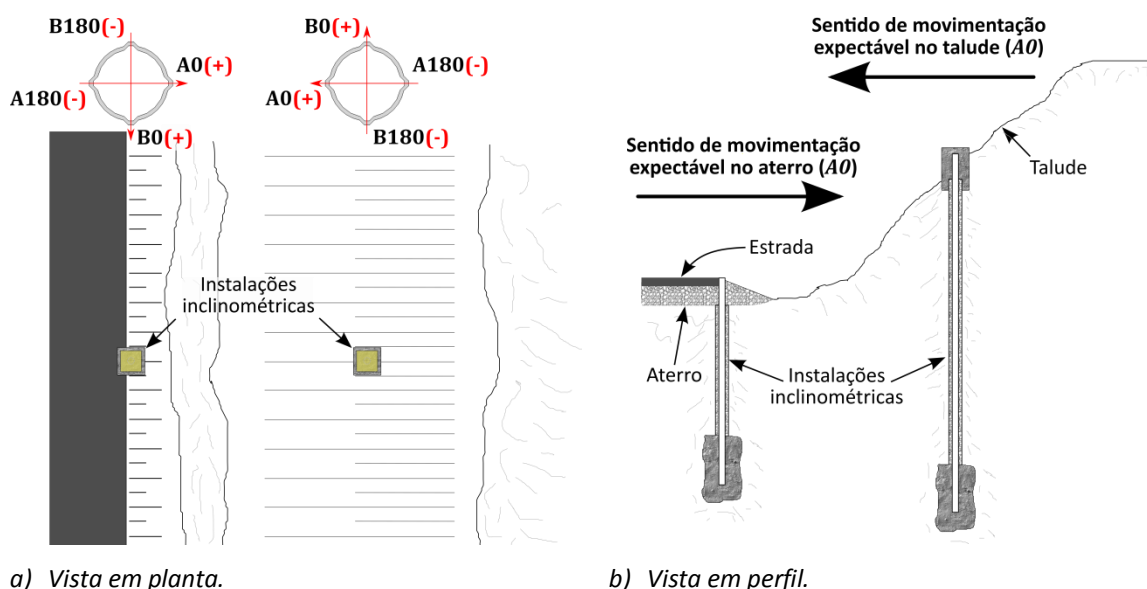


Figura 24 – Alinhamento das calhas inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2016).

<sup>1</sup> A direção onde se espera o desenvolvimento de deslocamentos é normalmente designada por *A* ou *Principal* (5.1). Esta direção deve constar no plano de trabalhos, podendo haver necessidade de utilizar algum dispositivo que permita a correta orientação azimutal das calhas inclinométricas (in ex.: bússola).

É importante proceder ao alinhamento das calhas inclinométricas com o tubo suspenso para evitar a resistência à rotação por atrito no fundo ou nas paredes do tubo. Se possível, o tubo deve manter-se relativamente alinhado durante a sua introdução no interior do furo. No caso de haver necessidade de realinhamento após a sua introdução, o tubo deve ser novamente levantado para que se proceda ao realinhamento com o mínimo de resistência. A rotação do tubo sem atender a esta exigência potencia a ocorrência de torções que podem afetar a qualidade dos resultados inclinométricos (6).

### 3.4.6. Encastramento do tubo inclinométrico

O encastramento do tubo consiste na injeção de calda de cimento numa extensão de 2,5 m a 5,0 m de comprimento. Na determinação do comprimento efetivo do maciço de encastramento é conveniente assegurar-se um espaçamento mínimo de 0,5 m entre o topo do mesmo e a união mais próxima (Figura 25). Para satisfazer esta condicionante poderá ser necessário cortar o troço de tubo mais profundo a fim de alterar a posição das uniões e permitir a injeção de calda em quantidade adequada. Contudo, este procedimento deve ser registado para que a profundidade aproximada das uniões seja conhecida. Pois, as zonas de união estão muitas vezes associadas à ocorrência de erros de medição com um padrão característico que interessa identificar (6.4.7).

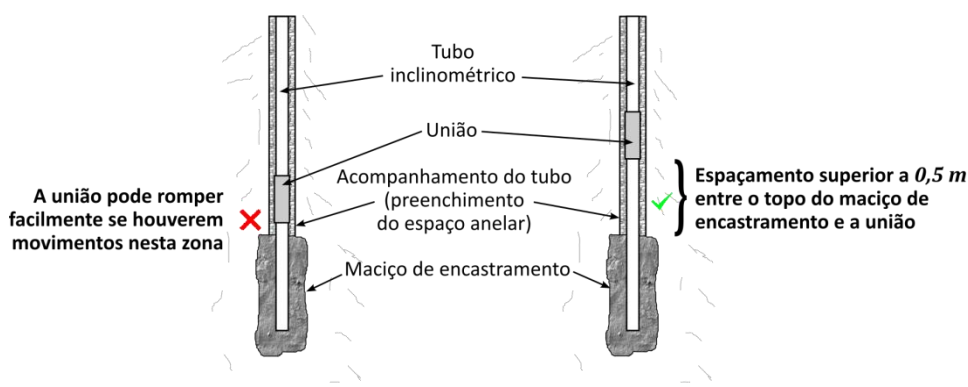


Figura 25 – Precauções adicionais a considerar para o dimensionamento da extensão do maciço de encastramento a executar (adaptado de Coimbra, 2016).

A execução do maciço de encastramento requer a estabilização do tubo face à impulsão gerada pela calda durante o processo de injeção. A estabilização pode fazer-se com recurso (Figura 26):

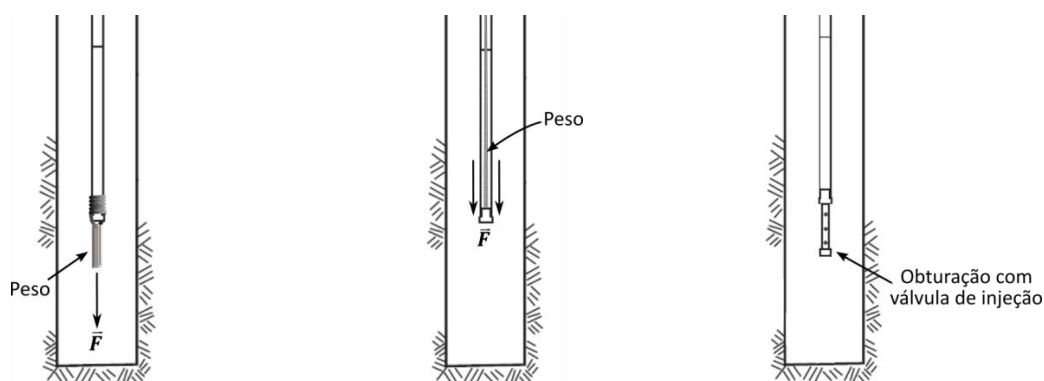
- a) a uma âncora que é parte integral da tampa de obturação (Figura 20ab, 3.4.4);
- b) à própria mangueira de injeção<sup>1</sup>;
- c) a um peso suspenso no fundo do tubo (in ex.: viga ou varão metálica/o);
- d) a um peso introduzido dentro do tubo e apoiado na sua base<sup>2</sup>.

<sup>1</sup> Requer uma tampa com válvula de injeção (Figura 20bc, 3.4.4).

<sup>2</sup> Por exemplo, varas de perfuração, varas de SPT, ou varões metálicos.

Note-se que o método c) obriga à verificação do comprimento do furo, uma vez que a extensão duma peça suspensa pode condicionar o dimensionamento inicial da instalação, designadamente no que respeita à sua profundidade integral e às precauções referidas em 3.4.3 e na Figura 25. Por esta razão, na impossibilidade de aplicação dos métodos a) ou b), o método d) é preferível quando a força de estabilização requerida é substancial.

Em caso algum se deve colocar o tubo em compressão<sup>1</sup> (Dunnicliff, 1988). Este procedimento pode introduzir deformações iniciais excessivas e danos irreversíveis no tubo<sup>2</sup>, potenciando também o preenchimento deficiente do espaço anelar (3.4.7).



a) Força axial exercida por suspensão na base do tubo.

b) Força axial exercida no interior do tubo.

c) Força axial exercida pela mangueira de injeção.

Figura 26 – Metodologias de estabilização do tubo inclinométrico na ausência de acessório de fixação incluso na respetiva peça de obturação (in ex.: Figura 20ab, 3.4.4) (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 1997).

A magnitude da força axial a exercer ( $F$ ) pode estimar-se pela expressão (1), onde  $I$  é a força de impulsão,  $\rho_c$  é a massa volúmica da calda de injeção,  $D_e$  é o diâmetro exterior do tubo inclinométrico,  $l_e$  é o comprimento do maciço de encastramento a executar e  $g$  é a aceleração gravítica.

$$F > I; I(N) = \rho_c \pi \frac{D_e^2}{4} l_e g; g \cong 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

A calda de cimento a aplicar no maciço encastramento compõe-se normalmente pela relação, em peso, água: cimento  $\cong 1:2$ . A adição de agregado justifica-se na presença de maciços com elevado grau de permeabilidade (in ex.: muito fraturados ou porosos). Nestas situações a argamassa poderá ser mais ou menos grosseira conforme as necessidades, designadamente fina ou média, de acordo com as expressões (2) e (3), respetivamente. A mistura dos materiais deve ser mecânica, adicionando gradualmente os agregados à calda de cimento, do mais fino para o mais grosso.

$$\text{água: cimento: areia} \cong 1:2:4 \text{ (em peso); } 0,1 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areia}} \leq 0,3 \text{ mm} \quad (2)$$

<sup>1</sup> Por exemplo, aplicando a carga de reação no topo do tubo.

<sup>2</sup> Por exemplo, rotura das uniões e/ou torção das calhas inclinométricas.

$$\text{água:cimento:areia:areão} \cong 1:2:4:4 \text{ (em peso)}; 0,1 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areia}} \leq 0,3 \text{ mm}; 0,3 \text{ mm} \leq \phi_{\text{areão}} \leq 3,0 \text{ mm} \quad (3)$$

O encastramento do tubo inclinométrico pode fazer-se por (Figura 27):

- i. deposição por gravidade a partir do topo do furo de sondagem;
- ii. injeção por gravidade através de mangueira inserida no furo até à base do tubo;
- iii. injeção sob pressão através de mangueira inserida no furo/tubo até à base do tubo.

O método *i* adequa-se a argamassa média aplicada em furos com paredes regulares e sem água. O método *ii* adequa-se à aplicação de calda simples ou argamassa fina em furos com paredes irregulares e sem água. Na presença de água ou na impossibilidade de proceder à sua extração temporária, é necessário recorrer ao método *iii*, podendo o mesmo realizar-se através do espaço anelar ou, caso exista uma válvula de injeção incorporada no tubo (Figura 20bc, 3.4.4), a partir do interior do tubo inclinométrico. Note-se que o método *iii* implica custos adicionais associados a equipamento especializado, como sejam a bomba, a mangueira e o bico de injeção.

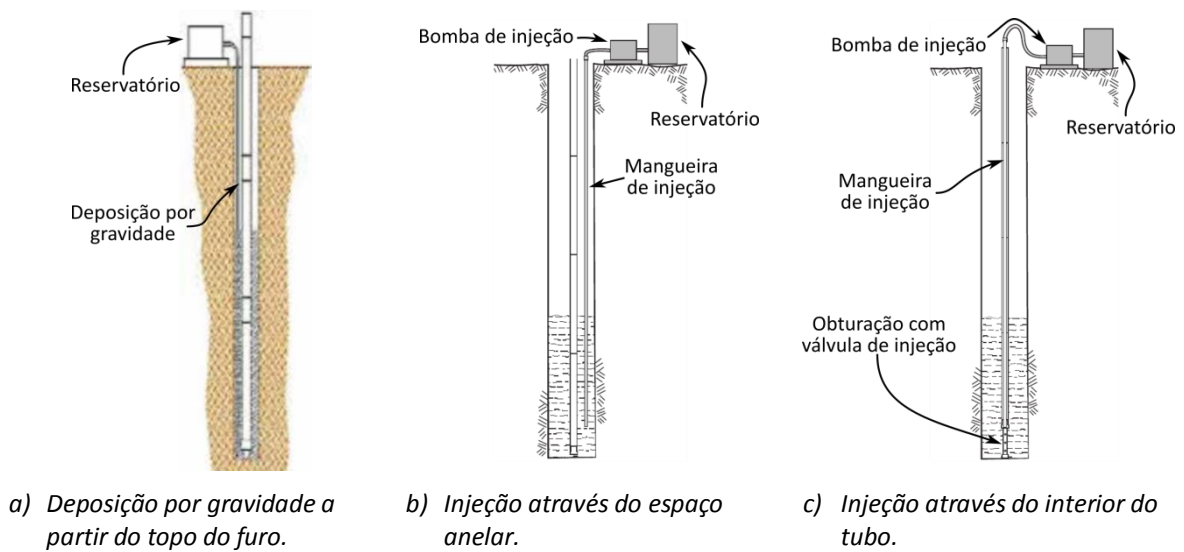


Figura 27 – Metodologias de execução do maciço de encastramento (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 1997; SISGEO, 2013b).

A execução do maciço de encastramento deve ser acompanhada pelo controlo do volume e da altura depositada(o). O volume necessário ( $V$ ) pode estimar-se através da expressão (4), onde  $k$  é um coeficiente de majoração para compensar eventuais perdas por migração para o interior do terreno e pela irregularidade das paredes do furo de sondagem,  $l_e$  é a extensão do maciço de encastramento,  $D_f$  é o diâmetro do furo e  $D_e$  é o diâmetro exterior do tubo inclinométrico.

$$V = k\pi l_e \frac{D_f^2 - D_e^2}{4}; 1,6 \leq k \leq 2,0 \quad (4)$$

É muito importante proceder-se à lavagem sistemática do tubo durante o período em que a calda



desenvolve presa (in ex.: 45 – 60 *min* após a execução). Pois, a experiência demonstra que a migração de detritos para o interior do tubo é quase inevitável, podendo estes agregarem-se e afetarem os dados inclinométricos ou mesmo obstruir e inutilizar a instalação.

#### **3.4.7. Preenchimento do espaço anelar entre o furo de sondagem e o tubo inclinométrico**

O preenchimento do espaço anelar<sup>1</sup> tem como objetivo assegurar a conformidade entre as deformações ocorridas no terreno e no tubo. A eficácia na transferência das forças geradas pela movimentação do terreno exige a satisfação de alguns critérios por parte dos materiais utilizados no acompanhamento do tubo, como sejam:

- preenchimento uniforme e completo do espaço anelar (in ex.: inexistência de vazios e boa compactação);
- características mecânicas compatíveis com as do terreno (in ex.: deformabilidade e resistência equiparável ou inferior à do terreno).

O preenchimento do espaço anelar faz-se normalmente com recurso a:

- a) material granular;
- b) calda adaptada às características mecânicas do terreno.

O material do tipo a)<sup>2</sup> utiliza-se sempre que é necessário controlar o nível de água no tubo<sup>3</sup>. Este tipo de material é muito eficiente na transferência das solicitações que lhe são impostas e acomoda-se bem à ocorrência de deformações<sup>4</sup>. No entanto, o uso deste tipo de material implica cuidados especiais relativamente à compactação e à uniformidade da sua distribuição ao longo do tubo. É importante manter o controlo sobre o volume introduzido e sobre a altura de enchimento ao longo do processo, promovendo a vibração do tubo para que a compactação seja eficiente e para que não se formem “pontes de material granular” que promovam a formação de vazios.

No caso de furos encamisados, cujo enchimento se faça com material granular, o processo tem que ser faseado, sob pena de rotura das uniões, devido às forças de atrito mobilizadas durante a extração do encamisamento. A experiência demonstra que a altura encamisada e preenchida com material granular não deve ultrapassar 1 *m*, devendo proceder-se à extração parcial do encamisamento sempre que este valor se aproxime (Figura 28).

A presença de maciços muito fraturados e/ou carsificados pode inviabilizar a execução do acom-

---

<sup>1</sup> Também designado por acompanhamento do tubo.

<sup>2</sup> Por exemplo, areão rolado, solto e lavado, com diâmetro inferior a 5 *mm*.

<sup>3</sup> Note-se que na presença de aquíferos confinados é necessário proceder ao isolamento e ao tamponamento do espaço anelar na zona de onde não se pretende obter a informação piezométrica.

<sup>4</sup> Plinninger et al. (2010) apresentam um estudo sobre a conformidade entre as deformações ocorridas e registadas que diferentes misturas oferecem. Os autores concluem que os materiais granulares oferecem melhor conformidade relativamente à deformação.

panhamento do tubo com material granular solto. Pois, nestas condições, este tipo de material é suscetível de apresentar assentamentos futuros significativos, sendo também lavado facilmente na decorrência da percolação de água no interior do maciço. Nestas situações pode utilizar-se argamassa média ((3), 3.4.6).

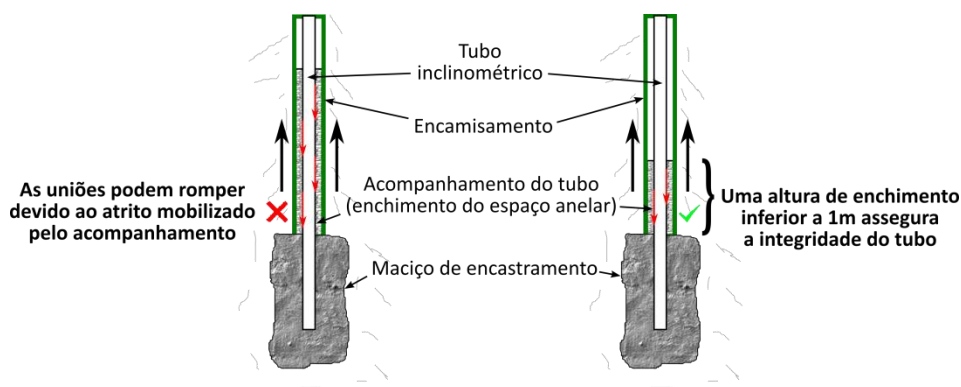


Figura 28 – Precauções a ter relativamente à remoção do encamisamento de um furo no decorrer da execução do preenchimento do espaço anelar com material granular solto (adaptado de Coimbra, 2016).

Os materiais do tipo *b)* utilizam-se normalmente quando não há necessidade de controlar os níveis de água através dos tubos inclinométricos. Há também outras situações em que é preferível utilizar este tipo de materiais, designadamente em solos muito deformáveis, ou furos muito irregulares, cujo preenchimento completo com material solto apresente dificuldades<sup>1</sup>. Nestes casos, a deformabilidade e resistência da mistura deve assemelhar-se à do terreno o melhor possível para garantir boa conformidade entre as deformações do solo e do tubo (Mikkelsen, 2002).

Estas misturas são normalmente compostas por cimento, água e bentonite, embora exista também uma grande variedade de caldas comerciais para aplicações específicas<sup>2</sup>. As equações (5) e (6) apresentam dois exemplos de composição destinados a solos de dureza baixa ou média a alta, respetivamente, onde  $f_c$  representa a resistência à compressão não confinada (SINCO, 2004).

$$\text{cimento: água: bentonite} \cong 1,0: 6,6: 0,4 \text{ (em peso); } f_c \cong 0,03 \text{ MPa} \quad (5)$$

$$\text{cimento: água: bentonite} \cong 1,0: 2,5: 0,3 \text{ (em peso); } f_c \cong 0,69 \text{ MPa; } E \cong 68.9 \text{ MPa} \quad (6)$$

A execução da mistura deve iniciar-se com água e cimento, com a posterior adição gradual da bentonite até que a textura requerida seja obtida (in ex.: cremosa e com baixa fluidez). A proporção *cimento: água* permite variar a resistência à tração e o módulo de deformabilidade da mistura, de forma a satisfazer os requisitos específicos de cada instalação (Figura 29).

A execução do acompanhamento com mistura bentonítica faz-se através do espaço anelar, no

<sup>1</sup> Alber et al. (2011) apresentam um estudo sobre a conformidade entre as deformações ocorridas e registadas que diferentes misturas oferecem. Os autores concluem que as misturas bentoníticas oferecem melhor continuidade de acompanhamento.

<sup>2</sup> Alber et al. (2011) e Plinninger et al. (2010) apresentam estudos sobre a conformidade entre as deformações ocorridas e registadas que diferentes misturas oferecem. Nestas publicações encontram-se referências a uma grande quantidade de caldas comerciais.

sentido ascendente, de forma análoga à execução do maciço de encastramento (Figura 27b, 3.4.6). No entanto, é necessário fasear este processo quando o comprimento da instalação é muito elevado (in ex.: superior a 60 m), uma vez que a pressão gerada pela mistura pode colapsar o tubo. Para este efeito deve consultar-se o fabricante/fornecedor no sentido de conhecer a pressão máxima suportável pelo tubo inclinométrico. De igual forma ao referido para o acompanhamento com material granular solto, devem registar-se os volumes injetados e a altura preenchida.

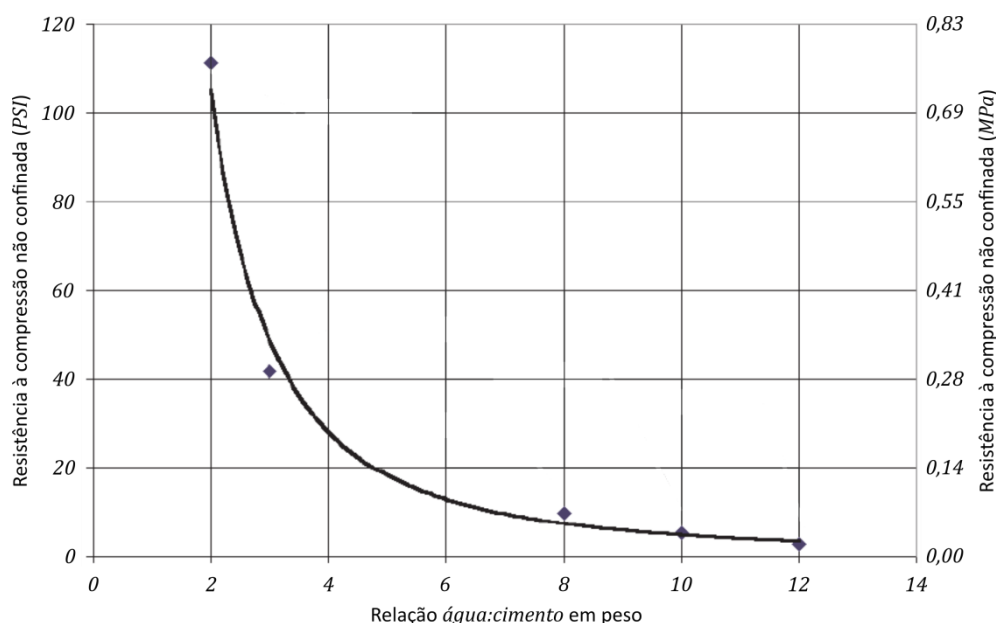


Figura 29 – Variação da resistência à compressão de uma mistura de cimento e bentonite em função da relação *água: cimento* (adaptado de Mikkelsen, 2002).

Independentemente do tipo de material utilizado, o volume necessário pode estimar-se a partir da equação (4) (3.4.6), sendo  $l_e$ , neste caso, a extensão de furo a preencher.

### 3.4.8. Proteção do topo do tubo inclinométrico e identificação do sentido principal

A proteção do topo do tubo tem como objetivo:

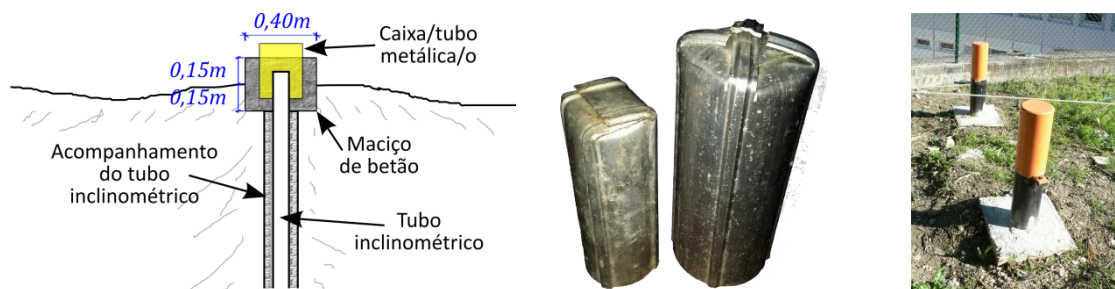
- evitar a acumulação de sujidade nas calhas inclinométricas;
- proteger a integridade do tubo de atos de vandalismo ou acidentais;
- facilitar a identificação e a localização do tubo.

A proteção pode consistir numa caixa de betão ou num tubo de aço parcialmente enterrado(a) no terreno, com uma tampa metálica, ou num simples obturador (Figura 30). O tipo de proteção a aplicar varia em função das condições locais<sup>1</sup>.

A identificação do tubo deve incluir a designação da instalação, a marcação da calha de sentido

<sup>1</sup> A regularidade da superfície do terreno, o tipo de solo e o respetivo uso podem favorecer a aplicação de um obturador simples ou a construção de uma caixa de betão.

*Principal* (Figura 24, 3.4.5) e a cota topográfica do topo do tubo ou do furo de sondagem.



a) Geometria das caixas de betão.

b) Obturadores moldados.

c) Obturadores comerciais.

Figura 30 – Proteção de tubos inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2016; Nunes & Sousa, 1986).

### 3.5. Instalações verticais em aterro

Existem duas metodologias para proceder à instalação de tubos verticais em aterro:

- instalação faseada durante a construção do aterro;
- instalação integral em furo de sondagem após a construção do aterro.

O método *a)* é normalmente preferível quando se pretende incorporar a observação interna de assentamentos na mesma instalação (Figura 31, 3.6). O encastramento do tubo executa-se de forma análoga à descrita em 3.4.6, prosseguindo-se depois a construção do aterro até que o nível de terraplanagem se aproxime do topo do tubo. Nesta fase procede-se à união de um troço de tubo adicional e retoma-se a construção, repetindo-se o processo até que o aterro seja concluído. Note-se que a salvaguarda da integridade do tubo exige alguns cuidados (Dunnicliff, 1988):

- os troços de tubo não devem ser excessivamente longos (in ex.: superiores a 1,5 m), não só por questões de estabilidade do tubo, como também devido à conformidade requerida para o acompanhamento das deformações verticais;
- o material de aterro em torno do tubo deve ser de granulometria mais fina;
- a compactação em torno do tubo exige cuidados acrescidos, de forma a garantir um nível de compactação adequado sem que o tubo seja danificado;
- o topo do tubo deve permanecer obturado a fim de evitar a acumulação de sujidade nas calhas inclinométricas e a deposição de detritos na sua base;
- o tubo deve estar sempre bem identificado a fim de evitar acidentes que o danifiquem.

O método *b)* aplica-se quando há necessidade de proceder à instalação de tubo inclinométricos que não estavam previstos, quando o método *a)* é mal sucedido ou impedido<sup>1</sup>, ou quando o projeto o prevê explicitamente<sup>2</sup>. Neste caso a instalação deve executar-se conforme descrito em 3.4.

<sup>1</sup> Por exemplo, devido à danificação do tubo por acidente ou a constrangimentos relacionados com a ordem de trabalhos da obra.

<sup>2</sup> Por exemplo, considerando a afetação da qualidade do aterro ou do prazo de execução da obra, ou pela ausência de um sistema de observação de assentamentos associado à instalação inclinométrica (3.6).

Dunnicliff (1988) refere ainda um método de instalação faseada em que se procede à compactação do aterro sobre o tubo, com posterior escavação para adição de novo troço. Embora o autor refira que este método oferece melhores níveis de compactação em redor do tubo e melhor proteção à sua integridade, convém notar que é mais trabalhoso, mais moroso e o volume de escavação poderá ser considerável devido à proteção e à ocultação do tubo.

### 3.6. Instalações verticais com observação interna de assentamentos

Este tipo de instalação tem por objetivo proporcionar a observação do perfil de assentamentos em profundidade sem necessidade de constituir uma instalação adicional. Aplicações típicas incluem a construção de barragens, aterros e/ou a consolidação de terrenos de fundação compressíveis.

Existem essencialmente dois tipos de sistema disponíveis para este fim (Dunnicliff, 1988):

- a) Sistema mecânico (ou de tesoura): âncora que se fixa na transição de uma união telescópica para o troço de tubo seguinte.
- b) Sistema magnético (ou de indução): sensor elétrico que deteta a presença de materiais ferrosos ou magnéticos. O tubo é instalado com uma série de anéis metálicos/magnéticos com um determinado espaçamento, podendo estes estar fixados no tubo ou ter movimento independente.

Qualquer dos sistemas é passível de ser instalado de forma integral ou faseada (3.5). No entanto, há particularidades que convém considerar:

- para assegurar a conformidade entre os deslocamentos verticais do terreno e do tubo, a instalação faseada é normalmente acompanhada pelo acoplamento de falanges metálicas aos troços de tubo instalados (Figura 31);
- o uso do sistema mecânico em instalações integrais não incorpora qualquer dispositivo que assegure a igualdade entre as deformações verticais do terreno e do tubo<sup>1</sup>;
- há dispositivos especializados que garantem a conformidade dos movimentos verticais em instalações integrais observadas com equipamentos magnéticos/indutivos<sup>2</sup> (Figura 32).

Assim:

- um sistema magnético com aranhas de fixação poderá oferecer maior conformidade de deformação vertical em instalações inclinométricas executadas em furo de sondagem, principalmente quando se trata da observação de solos compressíveis;
- o sistema mecânico instalado em aterro oferecerá maior conformidade de deformação vertical se a sua instalação for do tipo faseado (3.5), uma vez que o tubo incorpora elementos que garantidamente se movem juntamente com o terreno.

<sup>1</sup> Ou seja, o desempenho da instalação depende das forças de atrito desenvolvidas ao longo do tubo.

<sup>2</sup> Designados por aranhas, são anéis ferrosos/magnéticos com molas metálicas que se fixam lateralmente às paredes do furo.

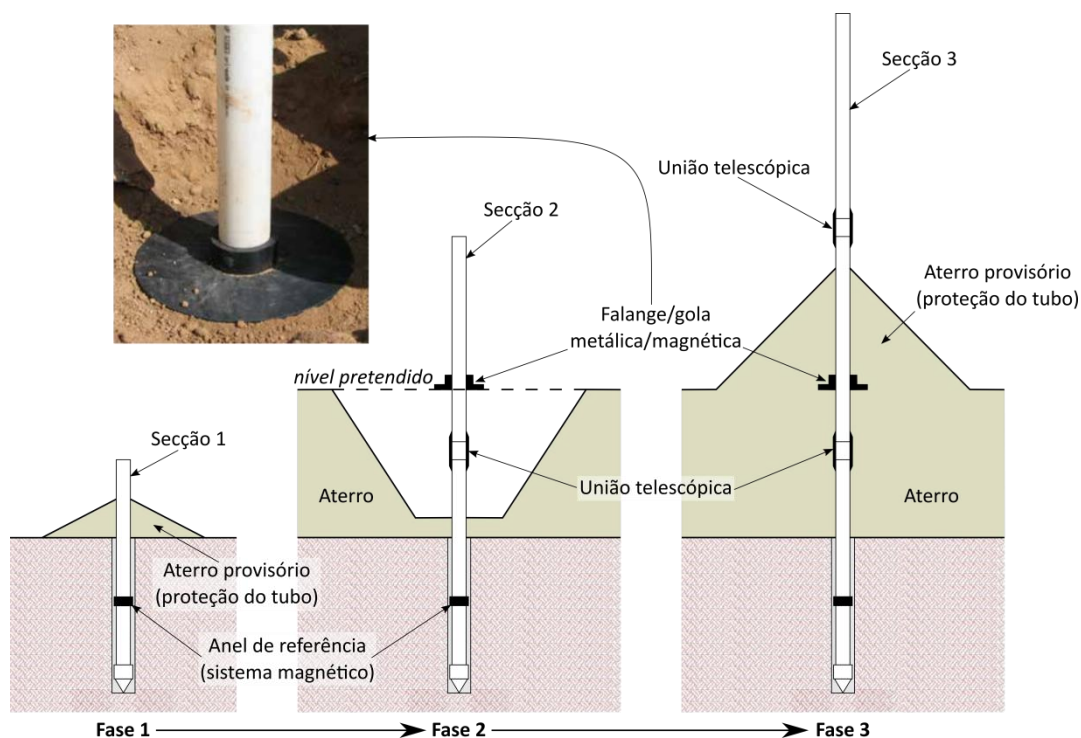


Figura 31 – Instalação faseada de tubos inclinométricos verticais associados a dispositivos para acompanhamento do perfil de assentamentos em profundidade (adaptado de Coimbra, 2016; SISGEO, 2013b).

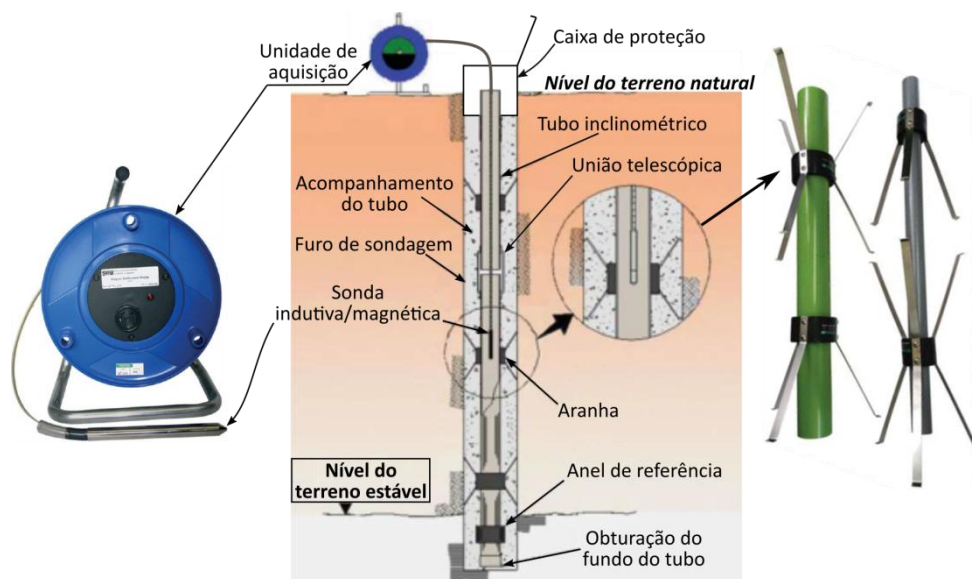


Figura 32 – Instalação inclinométrica em solo compressível, associada a dispositivos ferromagnéticos para observação do perfil de assentamentos (adaptado de ACE, 2016b; Coimbra, 2016; SOIL, 2013).

### 3.7. Instalações em vala ou trincheira

Este tipo de instalação aplica-se à observação de assentamentos, designadamente em barragens de terra e noutras obras de aterro. A sequência de procedimentos pode resumir-se da seguinte forma (Dunnicliff, 1988):

1. Escavação de trincheira com dimensões aproximadas de 0,3 – 0,6 m de largura e

0,6 – 1,0 m de profundidade<sup>1,2</sup>.

2. Deposição de uma camada de base com cerca de 0,15 m de espessura e constituída por material bem graduado<sup>3</sup>.
3. Posicionamento e confinamento do tubo inclinométrico<sup>4</sup>, utilizando o mesmo material depositado na base da trincheira<sup>5</sup>.
4. Cobertura do tubo com cerca de 0,15 m de espessura do mesmo material anteriormente utilizado.
5. Enchimento da vala com material de aterro compactado<sup>6</sup>.

Dunnicliff (1988) refere ainda um método alternativo (Figura 33):

1. Abertura de uma faixa relativamente extensa (in ex.: cerca de 4,0 m de largura por 0,2 m de profundidade).
2. Constituição de uma camada de base<sup>7</sup> compactada (in ex.: 1,5 m de largura por 0,15 m de espessura).
3. Instalação do(s) dispositivo(s) de observação (in ex.: tubos inclinométricos).
4. Cobertura do(s) dispositivo(s) de observação com cerca de 0,15 m de espessura do mesmo tipo de material utilizado na base<sup>7</sup>.
5. Suporte lateral<sup>8</sup> e compactação<sup>9</sup> do aterro constituído.
6. Deposição e compactação de uma camada protetora<sup>8,10</sup> (in ex.: cerca de 0,3 m).

Clements (1982, in: Dunnicliff, 1988) refere que o segundo método é mais rápido e mais fácil de executar, proporcionando também melhores resultados qualitativos. O mesmo autor refere uma série de inconvenientes associados à instalação de dispositivos de observação em trincheira que este método elimina (in ex.: drenagem deficiente e erosão interna – *piping*).

---

<sup>1</sup> Dependendo da carga aplicada durante a compactação, poderá ser necessária uma profundidade superior.

<sup>2</sup> Convém que a trincheira tenha um ligeiro declive no sentido da extremidade do tubo que permanecerá cessível.

<sup>3</sup> A dimensão máxima da maior partícula oscila normalmente entre 5 mm e 12 mm. No entanto, o material de cobertura poderá variar em função das características do aterro, da resistência do tubo inclinométrico, da espessura da cobertura e do equipamento de compactação utilizado.

<sup>4</sup> O tubo inclinométrico é montado anteriormente, procedendo-se à impermeabilização das uniões conforme descrito em 3.4.4.

<sup>5</sup> A orientação das calhas inclinométricas (3.4.5) é ainda mais crítica em instalações horizontais, uma vez que os sensores incorporados em sondas horizontais são normalmente unidireccionais (5.1). O tubo deve manter-se com um par de calhas orientado no plano vertical enquanto se procede ao seu confinamento lateral por deposição e compactação do material de acompanhamento.

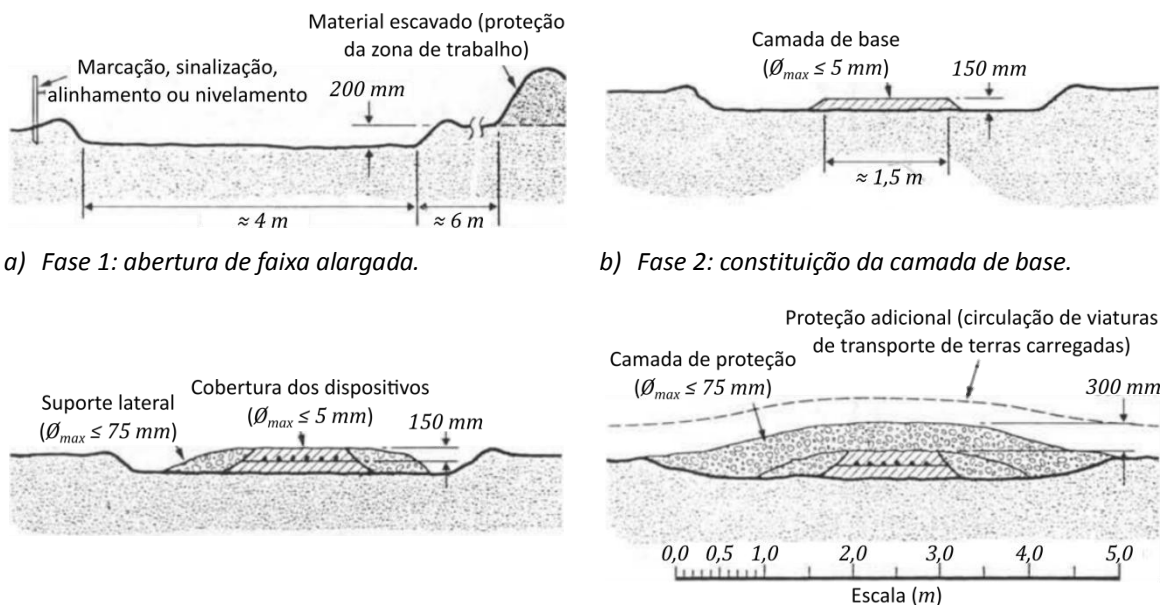
<sup>6</sup> A compactação deve ser manual e faseada em camadas com 100 – 200 mm de espessura.

<sup>7</sup> Clements (1982, in: Dunnicliff, 1988) refere 5 mm para a dimensão máxima da maior partícula da camada de base e de cobertura dos dispositivos a instalar.

<sup>8</sup> Clements (1982, in: Dunnicliff, 1988) refere o uso de material proveniente da escavação com dimensão máxima da maior partícula de 75 mm.

<sup>9</sup> Clements (1982, in: Dunnicliff, 1988) refere a aplicação de compactação manual.

<sup>10</sup> Clements (1982, in: Dunnicliff, 1988) refere ainda a deposição e compactação de uma segunda camada de proteção com cerca de 300 mm de espessura quando se prevê a circulação de viaturas de transporte de terras carregadas.



a) Fase 1: abertura de faixa alargada. b) Fase 2: constituição da camada de base. c) Fase 3: instalação e cobertura dos dispositivos. d) Fase 4: constituição da camada de proteção.

Figura 33 – Método alternativo para instalação de dispositivos de observação no interior de obras de aterro (adaptado de Clements, 1982, in: Dunnicliff, 1988).

A operação de sondas portáteis neste tipo de instalação pode fazer-se de três formas distintas (Dunnicliff, 1988; SINCO, 2004):

- a) uso de cabo de tração com uma roldana numa das extremidades do tubo e um tubo de retorno auxiliar paralelo ao tubo inclinométrico (Figura 34);
- b) uso de um cabo de tração e de uma vara para posicionar a sonda na posição inicial (in ex.: extremidade do tubo mais longínqua);
- c) uso de um cabo de tração operado por duas pessoas, uma em cada extremidade do tubo (Figura 35).

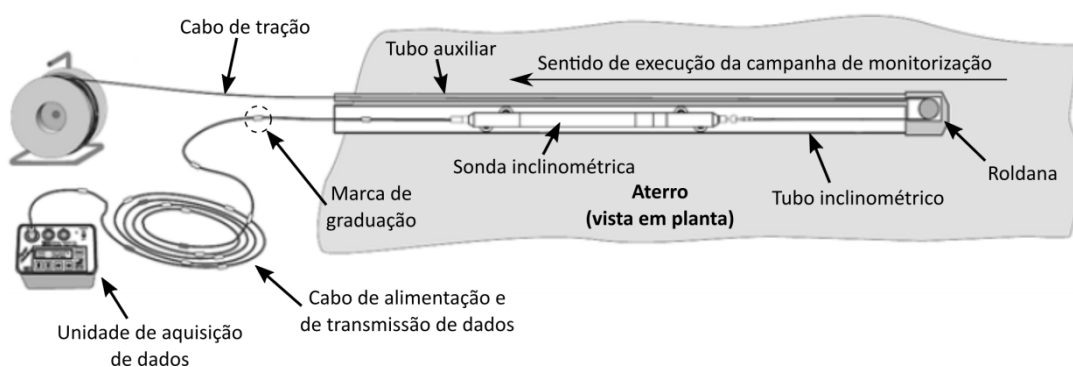


Figura 34 – Esquemática da operação de sondas inclinométricas horizontais portáteis em instalações com uma extremidade do tubo acessível (adaptado de SINCO, 2004).

Os métodos a) e b) aplicam-se em situações em que só há acessibilidade a uma das extremidades do tubo inclinométrico, sendo o método b) limitado a instalações de comprimento curto a médio (in ex.: até 60 m) e sem deformações consideráveis. O método c) aplica-se quando ambas as ex-



tremidades do tubo estão acessíveis. Em ambos os métodos *a)* e *c)*, o cabo de tração é instalado juntamente com o tubo inclinométrico, permanecendo no local durante o período de serviço da instalação inclinométrica. No método *c)* o cabo de tração é o próprio cabo de ligação e de controlo da posição da sonda (4.5).

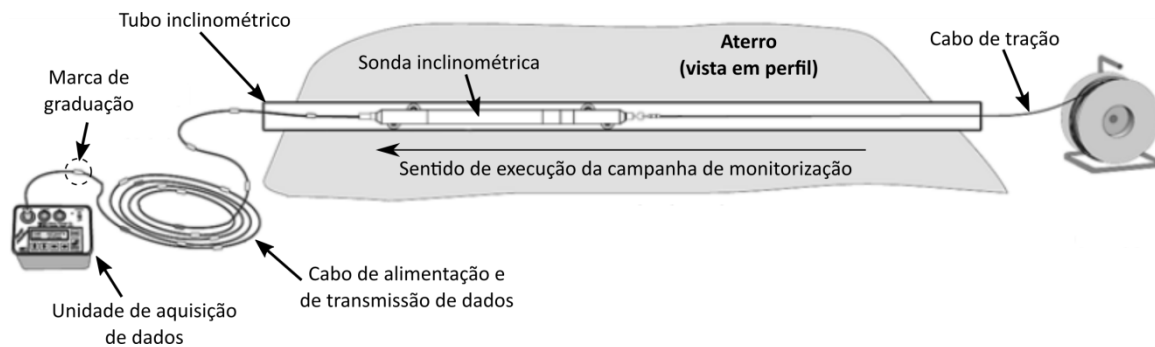


Figura 35 – Esquemática da operação de sondas inclinométricas horizontais portáteis em instalações com ambas as extremidades do tubo acessíveis (adaptado de SINCO, 2004).

### 3.8. Proteção de dispositivos contra interferências eletromagnéticas

Qualquer equipamento elétrico/eletrónico é suscetível de sofrer interferências eletromagnéticas em determinadas circunstâncias (Vijayaraghavan et al., 2004). No caso da instrumentação geotécnica, essa suscetibilidade pode verificar-se na proximidade de:

- linhas elétricas de alta tensão;
- fontes geradoras ou transformadoras de energia elétrica;
- estações de transmissão aérea de frequência modulada (in ex.: telecomunicações e radar);
- motores elétricos;
- cablagens danificadas em uso;
- descargas elétricas naturais em condições climáticas adversas (in ex.: trovoadas).

Há pouca informação sobre a ocorrência de interferências eletromagnéticas na instrumentação geotécnica, especificamente no que respeita aos equipamentos inclinométricos. Este fenómeno é difícil de prever e de quantificar, uma vez que está dependente de um conjunto de fatores, designadamente a frequência e amplitude de excitação elétrica, o alinhamento entre os planos de propagação energética e as propriedades condutivas do meio (Vijayaraghavan et al., 2004). Os acelerómetros encontram-se isolados no interior de um corpo metálico, por sua vez ligado ao terreno através do contacto entre as rodas e um tubo metálico ou pela imersão da sonda em água. Esta propriedade confere proteção aos sensores contra interferências eletromagnéticas. Contudo, tanto os cabos de ligação como as fontes de alimentação são suscetíveis a este tipo de interferência e constituem um veículo de transporte de diferenciais elétricos que podem danificar os sensores, a cablagem, ou perturbar a estabilidade do sinal (in ex.: introduzir uma constante de desvio – 6.4.2 – ou afetar a estabilidade das leituras – 6.3.3; 6.5).

Shoup (1992) refere este problema e apresenta três casos de estudo distintos, recomendando uma série de medidas de proteção (Quadro 8). A publicação dirige-se especificamente à proteção de instrumentação fixa contra descargas elétricas naturais em condições climáticas adversas. Pois, os instrumentos estão fixos e são mais suscetíveis a este tipo de interferência, uma vez que:

- implicam maior número de cabos e com maior extensão;
- incorporam fontes de geração, transformação e/ou transmissão elétrica ligadas a uma rede de distribuição;
- incluem-se num conjunto instrumental mais numeroso e diversificado;
- são suscetíveis a dano/interferência por descargas elétricas naturais, uma vez que operam continuamente.

Contudo, convém não esquecer que os instrumentos portáteis também são vulneráveis a interferências eletromagnéticas, cuja suscetibilidade aumenta em profundidade devido ao aumento da extensão de cabo. Embora as medidas de proteção abaixo apresentadas se apliquem apenas a instrumentação fixa, a hipótese de interferência eletromagnética deve ser considerada em equipamentos portáteis sempre que exibam comportamento errático circunscrito a determinado local de operação.

Quadro 8-1 – Medidas de proteção da instrumentação geotécnica fixa contra interferências eletromagnéticas (adaptado de Shoup, 1992) – *continua na próxima página.*

Medida	Descrição
Sistema de proteção subterrâneo para sensores e cabos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Condutor em cobre não isolado, paralelo a cada cabo ou grupo de cabos do sistema de observação.</li> <li>• O condutor deve estender-se desde cerca de 1,8 m abaixo de cada sensor até à respetiva unidade de alimentação/aquisição.</li> <li>• O condutor deve ter um afastamento de 0,1 – 3,6 m relativamente a qualquer instrumento, cabo ou unidade de alimentação/aquisição.</li> <li>• O condutor deve exibir resistência inferior a 0,1 <math>\Omega</math> ao longo de toda a sua extensão.</li> </ul>
Captura de raios de trovoadas para proteger o sistema de proteção subterrâneo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Pelo menos dois pára-raios colocados em dois extremos opostos e afastados do local instrumentado.</li> <li>• Afastamento de 100 – 1000 m de qualquer elemento da instrumentação, incluindo o respetivo sistema de proteção subterrâneo.</li> <li>• O condutor deve infiltrar o ambiente subterrâneo no plano vertical ou em sentido divergente ao da instrumentação.</li> <li>• O condutor deve atingir a profundidade do sensor mais profundo.</li> <li>• O condutor deve ter resistência inferior a 1 <math>\Omega</math> ao longo de toda a sua extensão.</li> </ul>
Verificação da resistência do isolamento de cabos e sensores	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A resistência entre os elementos sensoriais e a respetiva blindagem (in ex.: corpo da sonda) deve ser superior a 50 M<math>\Omega</math> para um diferencial de 500 V.</li> <li>• A resistência entre o sistema sensorial e o terreno deve ser superior a 10 M<math>\Omega</math> para um diferencial de 500 V (in ex.: sensores e cabos, excluindo a unidade de alimentação/aquisição).</li> </ul>
Medidas de proteção primária das ligações às unidades de alimentação/aquisição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Só devem ser implementadas na presença de um sistema de proteção subterrâneo para sensores e cabos.</li> <li>• A implementação deste tipo de medidas sem um sistema de proteção subterrâneo pode proteger as unidades de alimentação/aquisição, mas agravar as consequências em cabos e sensores.</li> </ul>

Quadro 8-2 – Medidas de proteção da instrumentação geotécnica fixa contra interferências eletromagnéticas (adaptado de Shoup, 1992) – *continuação*.

Medida	Descrição
Isolamento dos cabos de transmissão de dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>O isolamento de cabos de transmissão de dados é recomendado sempre que a resistência do sistema de proteção subterrâneo seja superior a <math>0,1 \Omega</math> para um diferencial de <math>500 V</math>.</li> </ul>
Proteção do sistema de alimentação elétrica	<ul style="list-style-type: none"> <li>A ligação à rede de distribuição elétrica deve fazer-se através de uma UPS<sup>i</sup> isolada ou de um transformador de isolamento.</li> <li>O transformador de isolamento deve ter uma capacidade de retenção superior a <math>2500 V</math> e uma capacidade de rejeição de ruído em modo comum<sup>ii</sup> de <math>120 dB</math>.</li> <li>As ligações à terra da entrada e da saída do transformador de isolamento devem estar isoladas.</li> <li>A ligação à terra da saída do transformador de isolamento deve fazer-se pelo sistema de proteção subterrâneo.</li> </ul>
Proteção do sistema de transmissão remota de dados	<ul style="list-style-type: none"> <li>Caso se utilize a rede telefónica para transmissão remota de dados, o modem deve estar devidamente protegido.</li> </ul>
Proteção da ligação entre a unidade de aquisição e o computador	<ul style="list-style-type: none"> <li>Ligações de série a computadores devem ser protegidas por isoladores óticos com capacidade mínima de <math>500 V</math>.</li> </ul>
Remoção de cabos e sensores danificados da rede	<ul style="list-style-type: none"> <li>Cabos e sensores que apresentem resistividade inferior a <math>1 M\Omega</math> relativamente ao terreno devem ser desligados da rede.</li> </ul>
Minimização de interferências entre sinais sensoriais	<ul style="list-style-type: none"> <li>O dimensionamento de sistemas de aquisição deve minimizar o cruzamento de sinais provenientes de sensores diferentes, de forma a evitar que dispositivos danificados influenciem as leituras de dispositivos em bom estado de funcionamento.</li> </ul>
Limitação de voltagens secundárias nas unidades de aquisição	<ul style="list-style-type: none"> <li>É necessário limitar as voltagens de entrada em unidades de aquisição que não ofereçam um isolamento mínimo de <math>500 V</math> entre todos os terminais.</li> <li>Os dispositivos de limitação de voltagem secundária devem oferecer proteção para um pico exponencial de <math>1500 W</math> com <math>10 \times 1000 ms</math> nos ramos ascendente e descendente, respetivamente.</li> </ul>

<sup>i</sup>Uma UPS (Uninterruptible Power Supply) é um conjunto de baterias destinado a manter o fornecimento de energia elétrica em caso de falha da rede de distribuição, desempenhando também a função de estabilização da corrente elétrica (Vijayaraghavan et al., 2004).

<sup>ii</sup>O ruído elétrico em modo comum advém de interferências externas captadas pela cablagem que viajam simultaneamente em todos os condutores ativos (Vijayaraghavan et al., 2004).

## 4. OPERAÇÃO E MANUTENÇÃO DE EQUIPAMENTOS INCLINOMÉTRICOS

### 4.1. Procedimentos operacionais para a realização de campanhas inclinométricas

A execução de uma campanha inclinométrica envolve os seguintes elementos (Figura 15, 2.4.3):

- sonda inclinométrica (4.3);
- dispositivo de referência para controlo da profundidade (4.4);
- cabo de ligação e de controlo da profundidade (4.5);
- unidade de alimentação elétrica e de aquisição de dados (4.6).

Os seguintes acessórios poderão também ser necessários:

- a) Sonda placebo (Figura 15, 2.4.3): réplica de sonda sem sensores incorporados destinada à verificação da capacidade de circulação da sonda inclinométrica no interior do tubo.
- b) Alonga (Coimbra, 2016): troço de tubo com união acoplada numa das extremidades, destinado a proporcionar maior conforto e melhor controlo da profundidade aos operadores.

O acessório *a)* permite detetar profundidades onde se verifiquem obstáculos à circulação sem risco de prisão para a sonda inclinométrica. Importa registar estas profundidades e, mediante a existência de zonas de resistência à passagem deste acessório, a execução da campanha deve ser seriamente ponderada; pois a recuperação de sondas inclinométricas nem sempre é fácil (4.3.2). Assim, a sonda placebo deve utilizar-se:

- sempre que a deformação do tubo se aproxime de valores que possam comprometer a passagem da sonda inclinométrica (5.8.3);
- em instalações suscetíveis com períodos muito alargados entre observações;
- em instalações recentes, onde não haja um histórico de observações anteriores;
- em instalações que abranjam zonas de intervenção, designadamente onde possam ocorrer deslocamentos inesperados.

O acessório *b)* justifica-se em instalações cujo topo do tubo se encontre muito próximo ou abaixo da cota superficial do terreno e cujo dispositivo de referência para controlo da profundidade seja do tipo *roldana + mordentes* (Figura 40, 4.4). Por conveniência, o comprimento útil deste acessório (in ex.: excluindo a união acoplada) é normalmente múltiplo do passo de leitura da sonda.

No sentido de assegurar a conformidade das profundidades de medição (6.4.4), a mesma alonga deve ser sistematicamente utilizada em determinada instalação que o requeira. Da mesma forma, a conformidade das profundidades de medição também pode ser afetada por alterações introduzidas no cabo inclinométrico (4.5) ou no tipo de dispositivo de referência para controlo da pro-

fundidade (4.4). Portanto, é boa prática manter o mesmo cabo<sup>1</sup> e o mesmo tipo de dispositivo de referência durante o tempo de serviço de determinada instalação.

A utilização da mesma sonda inclinométrica ao longo do período de observação de uma determinada instalação é igualmente importante (4.2; 6.4.3). Pois, os resultados inclinométricos incorporam erros de medição que são acumulados ao longo da profundidade (6.2) e a permuta de instrumentos releva pequenas divergências entre sensores, tais como o alinhamento axial<sup>2</sup> e o desvio na origem<sup>3</sup>. Apesar de isoladamente parecerem desprezáveis, estas divergências tornam-se frequentemente inoportáveis em resultados acumulados (6.4.2; 6.4.3; 6.4.5).

É da maior importância verificar o bom funcionamento dos equipamentos de medição antes e após cada serviço de observação. A manutenção de um registo de testes executados e de anomalias detetadas é também muito importante para o planeamento conjunto das operações de campo e de manutenção dos equipamentos. Pois, as campanhas inclinométricas são normalmente de carácter periódico e têm lugar num conjunto de instalações de determinada obra, mais ou menos distante da sede de trabalho, ao longo de um ou de vários dias, podendo abranger a deslocação de duas ou mais pessoas. Logo, qualquer anomalia que impeça a obtenção de dados ou que coloque em causa a fiabilidade dos mesmos, independentemente do número de instalações em que ocorra, implica, potencialmente, o dobro dos custos afetos à execução.

O conjunto de procedimentos afetos à realização de uma campanha inclinométrica pode resumir-se da seguinte forma<sup>4</sup> (Figura 36):

1. Acoplamento do dispositivo de referência para controlo da profundidade (4.4).
2. Ligação do cabo de alimentação e de controlo da profundidade (4.5).
3. Ligação da alimentação eléctrica do equipamento (4.3; 4.6).
4. Introdução da sonda no tubo, orientada no sentido positivo de medição (Figura 38, 4.3.1):
  - por conveniência, o sentido de medição positivo é coincidente com aquele em que se espera o desenvolvimento de deslocamentos (Figura 24, 3.4.5; Figura 45, 5.1).
5. Descida do inclinómetro até ao fundo do tubo:

---

<sup>1</sup> Embora resistentes e geometricamente estáveis, os cabos inclinométricos sofrem alterações dimensionais durante o seu longo tempo de serviço. Por esta razão, a substituição de cabos inclinométricos implica quase sempre pequenas alterações de comprimento que, por sua vez, se traduzem em pequenas divergências nos respetivos valores de leitura. Na prática, estas diferenças correspondem a erros sistemáticos de profundidade (6.4.4). Mediante a necessidade de substituição do cabo inclinométrico, convém avaliar os espaçamentos entre marcas nos dois cabos e proceder à correção dos dados/resultados conforme descrito em 6.4.4, ou, alternativamente, reiniciar o histórico de observação (4.2; 5.6; ISO 18674-3, 2016).

<sup>2</sup> O alinhamento axial dos acelerómetros reporta-se à interferência interaxial das medições (in ex.: afetação de valores medidos no plano *A* devida à inclinação das calhas no plano *B* e vice-versa). O alinhamento inicial é normalmente inferior a  $\pm 0,5^\circ$ , mas este parâmetro evolui ao longo da vida útil do instrumento, principalmente em sensores do tipo apresentado em 2.2.4 (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000).

<sup>3</sup> O desvio na origem é normalmente eliminado durante o processo de cálculo (5.1). Contudo, este processo pode ser deficiente para instrumentos com desvio na origem muito elevado que operem em inclinações relativamente acentuadas (6.3.2).

<sup>4</sup> Note-se que os procedimentos apresentados referem-se a inclinómetros bidireccionais. A sua aplicabilidade a instrumentos unidireccionais implica duas sequências adicionais de aquisição de dados nos sentidos *B0* e *B180* (Figura 24, 3.4.5; Figura 45, 5.1).

- é importante conhecer a profundidade do tubo para que a aproximação ao fundo seja cuidada, evitando o choque da sonda na base do tubo;
  - é igualmente importante atingir a base do tubo para confirmar a profundidade aproximada do tubo (6.4.4).
6. Subida do inclinómetro até à primeira marca de graduação<sup>1</sup>:
    - é importante posicionar o instrumento por ascensão (in ex.: garantindo que o cabo é colocado sob tensão).
  7. Imobilização da sonda durante 5 a 10 minutos (Dunnicliff, 1988; ISO 18674-3, 2016; Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000, 2006a, 2014; SOIL, 2014d):
    - este passo é da maior importância para evitar a ocorrência de derivas temporárias no desvio na origem (6.4.2; 6.4.5), uma vez que a sensibilidade térmica do instrumento é reduzida após o aquecimento dos sensores e respetivos circuitos integrados;
    - note-se que este procedimento não é exclusivo a situações com gradientes térmicos acentuados<sup>2</sup>, uma vez que a deriva por causas térmicas também pode ocorrer durante o período de aquecimento interno do próprio instrumento.
  8. Imobilização da sonda até estabilização dos valores:
    - este processo dura normalmente 2 a 5 segundos;
    - o processo de estabilização pode ser mais longo ou não ser possível, tendo, ou não, carácter sistemático e ocorrendo, ou não, numa instalação ou obra específica<sup>3</sup>;
    - a ocorrência sistemática de tempos de estabilização anormais deve ser comunicada à(s) equipa(s) responsável(eis) pela análise de dados e de resultados, no sentido de desencadear um processo de investigação sobre o fenómeno e de verificar as margens de erro associadas aos resultados (6.5).
  9. Registo da leitura e subida da sonda até à próxima marca de graduação<sup>1</sup>.
  10. Repetição dos passos 8 e 9 até ao topo do tubo, excluindo a alonga, se utilizada:
    - as medições inclinométricas nunca devem ultrapassar o nível superficial do terreno ou da estrutura sob observação, uma vez que esses dados podem resultar num erro de análise sobre a existência de deslocamentos superficiais que, na verdade, resultam da mobilidade da alonga conferida pela folga entre a união e o tubo inclinométrico.
  11. Extração da sonda, rotação em 180° e reintrodução da mesma no tubo, desta vez orientada no sentido negativo de medição (Figura 38, 4.3.1).
  12. Repetição dos passos 5 a 10, excluindo o passo 7.
  13. Remoção do inclinómetro do tubo.
  14. Corte da alimentação elétrica.
  15. Remoção da cablagem e acondicionamento dos equipamentos, incluindo o dispositivo de referência para controlo da profundidade.

<sup>1</sup> Ver secções 4.4 e 4.5 no que respeita aos requisitos necessários para o correto controlo da profundidade.

<sup>2</sup> Por exemplo, devido à existência de água no interior no tubo, principalmente durante a época fria.

<sup>3</sup> A estabilização das leituras inclinométricas pode ser afetada por múltiplos fatores, incluindo um nível deficiente de carga nas baterias, o mau funcionamento dos sensores, o acompanhamento deficiente do tubo inclinométrico e a existência de vibrações (6.4.6; DGSI, 2007). Sob determinadas condições (in ex.: na proximidade de linhas elétricas de alta tensão), poderão ainda ocorrer interferências eletromagnéticas que afetem a estabilidade das leituras (3.8).

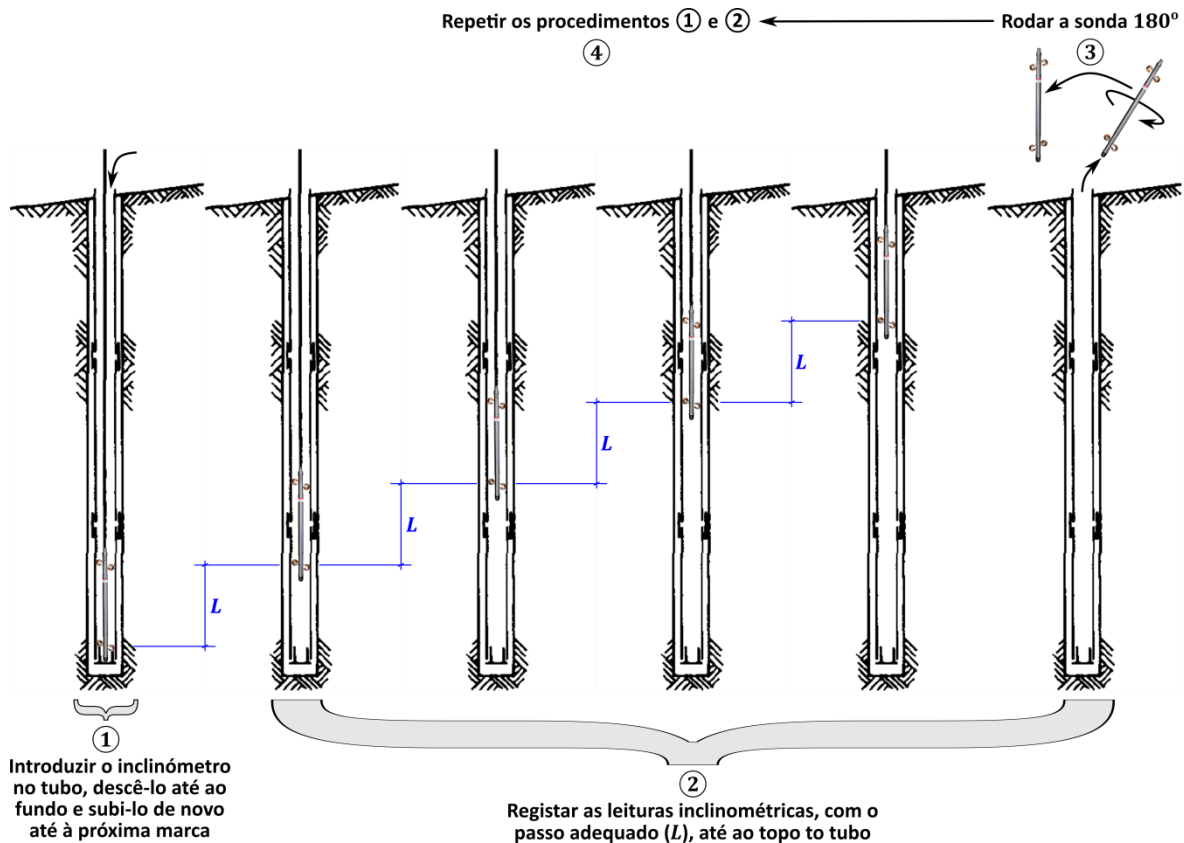


Figura 36 – Procedimentos gerais para a realização de campanhas inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2016; Dunnicliff, 1988; GEONOR, 2017).

Os procedimentos para a realização de campanhas inclinométricas em instalações horizontais são idênticos aos apresentados com duas exceções:

- apenas o par de calhas inclinométricas orientado no plano vertical é medido;
- a rotação do instrumento faz-se sobre um eixo perpendicular ao eixo longitudinal da sonda (in ex.: no plano horizontal).

#### 4.2. Critérios de execução e seleção de campanhas de referência

Tal como referido no capítulo 1, a observação inclinométrica dos movimentos internos faz-se através da comparação entre os resultados obtidos em duas datas distintas. Ou seja, há uma curva de perfil com data fixa que serve de referência, relativamente à qual todos os resultados posteriores são comparados. É comum designar-se por campanha de referência a curva com data fixa e por campanhas ordinárias aquelas cujos resultados são efetivamente utilizados para analisar a evolução do estado da obra.

Embora qualquer campanha possa constituir uma referência, sendo também possível a existência de várias campanhas de referência simultâneas no histórico de cada instalação (5.6), há determinados acontecimentos que requerem a realização de campanhas com o objetivo específico de constituir uma referência, tais como:

- primeira campanha inclinométrica após a execução de uma instalação (3);
- primeira campanha inclinométrica após a ocorrência de intervenções de obra onde uma ou várias instalações inclinométricas se insira(m)<sup>1</sup>;
- substituição do equipamento inclinométrico utilizado, seja ao nível da sonda (4.3), do respetivo cabo (4.5), do dispositivo de referência para controlo da profundidade (4.4) ou da alonga (4.1).

Em instalações novas, a campanha de referência deve realizar-se logo que o maciço de encastramento adquira presa (in ex.: 1 a 3 dias após a conclusão da instalação). Nos restantes casos a campanha de referência deve realizar-se logo que possível, devendo mesmo haver sobreposição desta com outra ordinária quando há substituição de equipamentos (5.6).

Como base de comparação para obtenção de resultados, a campanha de referência é de extrema importância e deve realizar-se redundantemente<sup>2</sup>. ISO 18674-3 (2016) recomenda a seleção da campanha de referência com base nos indicadores de qualidade do lote de campanhas inicial. Contudo, esta série de campanhas deve ser representativa do perfil da instalação e exibir indicadores de qualidade idênticos (6.3). A redundância tem por objetivo o despiste de discrepâncias que indiquem alguma característica particular da instalação ou outro tipo de problema<sup>3</sup>. Sempre que se obtenham resultados inconsistentes neste lote de campanhas a sua causa deve ser investigada<sup>4</sup>. Portanto, não se recomenda qualquer critério para seleção de uma campanha de referência de entre o conjunto obtido para o efeito, a não ser por exclusão de alguma que não se considere representativa do conjunto. Deste princípio infere-se que se considera insuficiente um conjunto de 2 campanhas iniciais.

#### **4.3. Sonda inclinométrica**

##### **4.3.1. Cuidados operacionais e principais medidas de manutenção**

As sondas inclinométricas são dispositivos extremamente sensíveis, principalmente quando incorporam servoacelerómetros de equilíbrio de força com indução magnética (2.2.4). Por esta razão é muito importante que se proceda ao seu armazenamento, transporte e manuseamento de forma cuidada, mais concretamente no que respeita à ocorrência de choques e de vibrações intensas, particularmente quando o instrumento se encontra desligado. Mesmo havendo maior resistência ao choque em inclinómetros com sensores MEMS (2.2.5), os procedimentos que aqui se

<sup>1</sup> Embora a ocorrência de intervenções possa não afetar todas as instalações inclinométricas da respetiva obra, pode ser conveniente proceder ao reinício do histórico de medições inclinométricas em todas as instalações, de forma a avaliar o comportamento global da obra a partir desse momento.

<sup>2</sup> Normalmente 2 a 3 campanhas sequenciais (DGSI, 2007; Dunncliff, 1988; ISO 18674-3, 2016).

<sup>3</sup> Por exemplo, relacionado com a qualidade da instalação ou com o mau funcionamento do equipamento inclinométrico.

<sup>4</sup> Por exemplo, introduzindo-se redundância adicional ou procedendo-se a uma análise de qualidade mais aprofundada que procure identificar a ocorrência de erros sistemáticos localizados com determinado padrão (6.4.7).



apresentam são boas práticas a seguir.

Na Figura 37 apresenta-se o interior de uma sonda inclinométrica, onde se observa a bobina sensorial e a massa pendular de um servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (Figura 7, 2.2.4). Note-se que, neste caso, não há qualquer travamento que impeça a massa pendular de pressionar a bobina sensorial, sendo por isso recomendável que o instrumento seja armazenado na posição correspondente ao seu plano de referência (2.3). Esta recomendação é também expressa por Coimbra (2011) e SINCO (2006a); pois, o peso da massa sobre a bobine por períodos prolongados contribui para a sua deformação, traduzindo-se, efetivamente, numa deriva precoce e acelerada do desvio na origem (6.3.2).

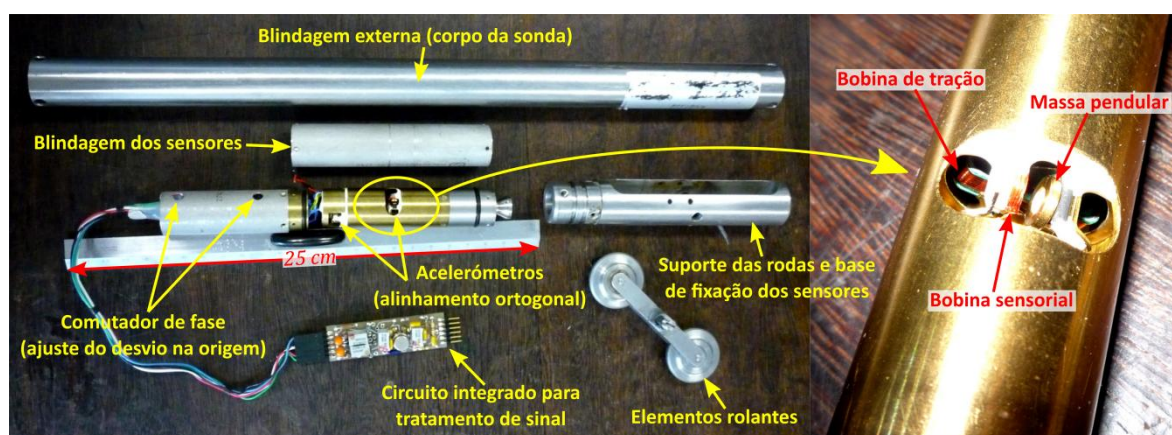


Figura 37 – Constituição interna de um inclinómetro com servoacelerómetro de equilíbrio de força com indução magnética (adaptado de Coimbra, 2016, 2011).

Ainda relativamente à proteção da bobine sensorial, é igualmente importante ligar o instrumento anteriormente à sua introdução no tubo inclinométrico e desligá-lo após a sua remoção do mesmo (SINCO, 2006a). Pois, tratando-se de um sensor servoacelerado, a massa pendular é permanentemente centralizada enquanto ativo. Esta característica limita a oscilação da massa e protege a bobina sensorial<sup>1</sup> contra choques acidentais que possam ocorrer. Outras medidas de proteção dos sensores contra choques acidentais incluem (DGSI, 2007; SINCO, 2014, 2006a):

- transporte do instrumento acondicionado no interior da respetiva mala;
- introdução e remoção da sonda no tubo inclinométrico com o auxílio das mãos, no sentido de evitar que a expansão das molas incorporadas nos elementos rolantes provoque o choque da sonda contra o tubo.

A proteção da sonda contra a humidade implica:

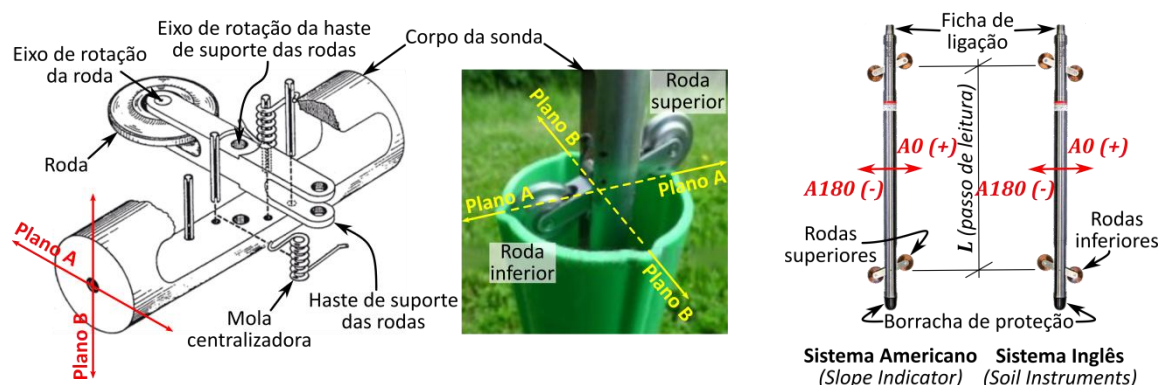
- baixa humidade relativa no local de armazenamento;
- proteção dos terminais de ligação em dias chuvosos.

<sup>1</sup> Embora nem todos os sensores incorporem bobinas sensoriais (in ex.: MEMS, 2.2.5), este procedimento confere proteção a qualquer sensor inercial servoacelerado.

Em instrumentos com cabo inclinométrico destacável, destacam-se os seguintes procedimentos adicionais relativamente à manutenção do terminal da sonda:

- aperto adequado da ficha<sup>1</sup>;
- verificação periódica da condição dos vedantes<sup>2</sup>;
- lavagem/limpeza e secagem da sonda após cada dia de serviço<sup>3</sup>.

Na Figura 38 apresenta-se um esquema das rodas de um inclinómetro e a forma como estas se relacionam com os planos de medição e com os respetivos sentidos<sup>4</sup>. Note-se que a função das rodas de um inclinómetro não se limita a auxiliar o seu deslocamento, servindo também para manter a orientação azimuthal<sup>5</sup> e a centralidade no interior do tubo<sup>6</sup>. Estas funções adicionais são de extrema importância para a obtenção de dados coerentes, uma vez que alterações em qualquer das variáveis traduzem-se em alterações de inclinação e, conseqüentemente, dos deslocamentos calculados (6.3).



a) Pormenor das rodas de um inclinómetro e dos respetivos planos de medição. b) Relação entre as rodas de um inclinómetro e o sinal de leitura.

Figura 38 – Pormenor dos elementos rolantes de uma sonda inclinométrica. Relação com os planos de medição e com o respetivo sinal de leitura (adaptado de Coimbra, 2016; GEONOR, 2017; GOUDA, 2017; SINCO, 2006b, 2014; SOIL, 2014d).

A manutenção das rodas inclinométricas implica (SINCO, 2006a, 2014; SOIL, 2014d):

- lavagem, limpeza e lubrificação dos elementos rolantes e das respetivas molas centralizadoras após cada dia de serviço (in ex.: com um óleo fino não corrosivo);

<sup>1</sup> O aperto deve induzir uma certa deformação dos vedantes e oferecer uma resistência razoável à torção, mas o esmagamento dos vedantes é de evitar (in ex.: o aperto manual é normalmente suficiente; DGSI, 2007; SINCO, 2014, 2006a).

<sup>2</sup> A periodicidade de verificação dependerá sempre da frequência de utilização. Vedantes enrijecidos, corroídos (in ex.: descolorados), desgastados, permanentemente deformados ou danificados de qualquer outra forma devem ser substituídos.

<sup>3</sup> Pode ser necessário proceder à lubrificação ocasional da ficha de ligação com um óleo apropriado (in ex.: não condutor e não corrosivo). SINCO (2014, 2006a) recomenda o arejamento da ficha durante após a operação do instrumento em dias chuvosos.

<sup>4</sup> Alguns instrumentos incluem uma inscrição dos sinais positivo/negativo no topo da sonda, mas a maioria utiliza uma das convenções indicadas na Figura 38b. O sentido positivo do plano de medição B (B +) corresponde sempre a uma rotação de 90° à direita de A + (Figura 45, 5.1).

<sup>5</sup> Este fator é controlado pelo estado das rodas e das calhas inclinométricas.

<sup>6</sup> Este fator é controlado pelo estado das molas centralizadoras.

- verificação da força das molas centralizadoras após cada dia de serviço<sup>1</sup>;
- verificação da existência de folgas e/ou de movimento constrangido das rodas e da haste que as suporta após cada dia de serviço<sup>2</sup>;
- verificação da existência de dano e/ou desgaste das rodas<sup>3</sup>.

Face ao exposto, é boa política dispor de um conjunto adicional de vedantes e de rodas inclinométricas; pois esta prática assegura a exclusão da condição física da sonda inclinométrica como causa provável para a obtenção de resultados inclinométricos anómalos.

#### **4.3.2. Recuperação de sondas inclinométricas**

Dependendo da magnitude e da distribuição das deformações experimentadas pela instalação, pode verificar-se a prisão e a perda da sonda placebo ou da sonda inclinométrica no interior do tubo (5.8.3). O Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) deparou-se diversas vezes com esta situação e, na grande maioria dos casos, foi bem sucedido na recuperação desses elementos. A técnica consiste na introdução de um tubo plástico<sup>4</sup> de pequena espessura e com a extremidade recortada em bisel (Figura 39). O objetivo é descer o tubo até que a sonda entre completamente no mesmo e posteriormente subir a sonda através desse tubo para evitar as deformações da instalação inclinométrica. Devem ser atendidos os cuidados seguintes:

- o tubo plástico não deve ser demasiadamente estreito relativamente ao diâmetro do tubo inclinométrico (in ex.: 50 *mm* para tubos médios ou largos; Figura 18, 3.2.3);
- o bisel necessita de uma extensão mínima igual ao eixo de apoio das rodas inclinométricas acrescido de uma vez o diâmetro de roda (Figura 39);
- é imperativo que o bisel seja alinhado com as rodas inclinométricas que estiverem direcionadas para a base da sonda (Figura 39);
- o cabo inclinométrico tem de ser passado pelo tubo, pelo que este método só se aplica a instrumentos de cabo destacável (2.4.3);
- o cabo inclinométrico tem de ser mantido sob tensão para evitar que se enrodilhe ou se prenda, e para facilitar a passagem do tubo;
- a sonda deve ser descida até que o tubo ultrapasse a zona da instalação mais crítica;
- o procedimento deve fazer-se com alguma paciência e sem movimentos demasiadamente bruscos, de forma a proteger a sonda e a integridade do tubo plástico;
- a sonda inclinométrica deve estar ligada para proteção dos sensores (4.1; 4.3).

<sup>1</sup> A força das molas pode verificar-se por aperto manual. A força exercida deve ser constante e aparentemente equivalente à força necessária para recolher a haste de um conjunto de rodas a estrear.

<sup>2</sup> A rotação total e livre deve exibir desaceleração aparentemente contínua (in ex.: sem resistências pontuais). Não devem ser perceptíveis folgas laterais ou verticais nos eixos de rotação das rodas ou da haste que as suporta.

<sup>3</sup> Por exemplo, cortes ou outro tipo de deformação visível.

<sup>4</sup> É importante que o tubo tenha alguma flexibilidade para vencer mais facilmente as deformações da instalação inclinométrica. Normalmente utiliza-se tubagem em PVC com 2 *mm* de espessura, em troços com 3 *m* de comprimento sequencialmente acoplados.

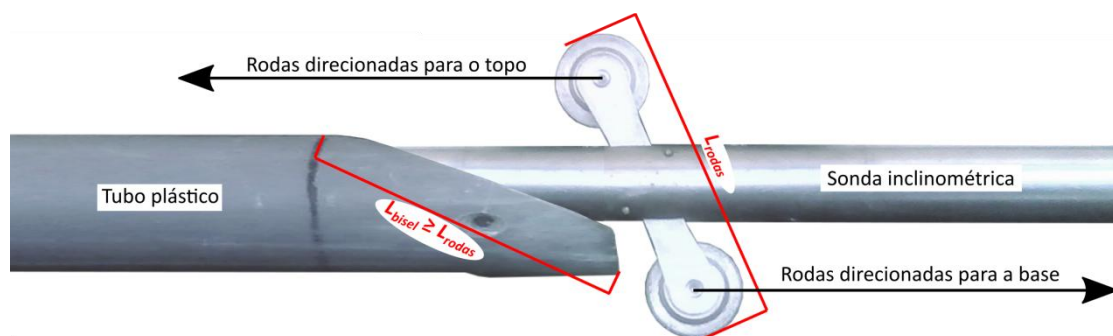


Figura 39 – Tubo plástico com recorte em bisel para recuperação de sondas inclinométricas.

#### 4.4. Dispositivo de referência para controlo da profundidade

O dispositivo de referência para controlo da profundidade tem por objetivo assegurar que as leituras inclinométricas se obtêm sempre às mesmas profundidades e com a sonda devidamente centrada no interior do tubo<sup>1</sup>. Este elemento é da maior importância para obtenção de resultados fiáveis, uma vez que a natureza do cálculo de deslocamentos inclinométricos é muito sensível a pequenas variações (5; 6.3). Portanto, a realização de campanhas inclinométricas utilizando o topo do tubo como referência não é recomendável<sup>2,3</sup>.

Existem dois tipos de dispositivo de referência para controlo da profundidade (Figura 40):

- a) roldada com mordentes de fixação (Figura 40ac);
- b) copo de apoio (Figura 40b).

O dispositivo a) caracteriza-se por um suporte metálico com uma abraçadeira de fixação ao tubo, uma roldana para guiamento do cabo e mordentes para fixação do mesmo. Na Figura 40ac observam-se dois tipos de mordente:

- com dentes metálicos (Figura 40a);
- com dentes revestidos (Figura 40c).

Embora qualquer tipo de cabo (4.5) possa ser utilizado com qualquer tipo de mordente, importa anotar duas particularidades:

- dentes não revestidos agarram melhor o cabo, mas provocam maior desgaste em marcas de graduação de borracha;
- dentes revestidos provocam menor desgaste em marcas de graduação de borracha mas são mais propensos ao deslize do cabo por fadiga das molas incorporadas nos mordentes.

<sup>1</sup> As rodas inclinométricas são concebidas para manter a sonda diametralmente centrada no interior do tubo, mas o movimento lateral do cabo no topo do tubo tem o potencial de afetar essa centralidade em profundidades mais superficiais.

<sup>2</sup> Por exemplo, encostando a marca de graduação ao tubo e mantendo o cabo imóvel até à estabilização das leituras.

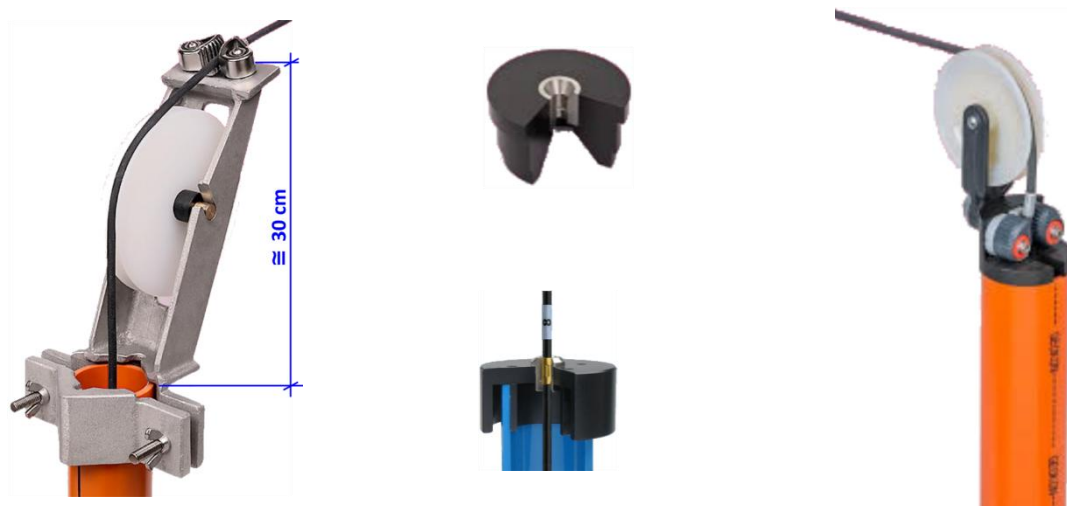
<sup>3</sup> A ausência de um dispositivo de referência para o controlo da profundidade introduz dependência entre a estabilização do instrumento e a estabilidade do operador durante o período de imobilização, obriga à excentricidade do cabo relativamente ao diâmetro do tubo e aumenta o risco de dano no cabo por atrito do mesmo no rebordo do topo do tubo.

O dispositivo *a)* depende fortemente da exatidão no posicionamento da sonda por parte do operador e implica alguns procedimentos adicionais de manutenção, pelo que importa:

- ponderar o uso de alonga em instalações cujo topo do tubo se encontra muito baixo (4.1);
- encostar devidamente a gola da abraçadeira ao topo do tubo;
- orientar a roldana no mesmo plano das rodas inclinométricas;
- estacionar a marca de graduação com uma exatidão de  $\pm 3mm$  (SINCO, 2006a, 2000);
- verificar a força das molas e qualquer constrangimento à rotação dos mordentes<sup>1</sup>;
- limpar e lubrificar os mordentes após cada dia de serviço.

O dispositivo *b)* caracteriza-se por um cilindro com um encapsulamento plano, contendo este um orifício central com uma peça moldada à medida das marcas de graduação metálicas. Na Figura 40b observa-se que o copo é longitudinalmente recortado em quadrante, de forma a possibilitar a introdução e a remoção do cabo inclinométrico. Este tipo de dispositivo oferece vantagens sobre o dispositivo *a)* por ser mais confortável de operar na generalidade das instalações (in ex.: dispensa o uso de um alonga; 4.1) e por oferecer um ponto de referência para controlo da profundidade independente do desempenho do operador. No entanto, o uso deste dispositivo também implica alguns cuidados operativos:

- encosto efetivo do dispositivo ao topo do tubo;
- ausência de choque durante o encaixe da marca de graduação no centro do copo.



*a) Dispositivo de roldana + mordentes com mordentes metálicos e distância padrão ao topo do tubo.*

*b) Copo de apoio para marcas metálicas.*

*c) Dispositivo de roldana + mordentes com mordentes plásticos e distância reduzida ao topo do tubo.*

Figura 40 – Dispositivos de referência para controlo da profundidade (adaptado de Coimbra, 2016; DGSI, 2014b, 2013c; GEOKON, 2016b, 2009a).

<sup>1</sup> As molas devem ser substituídas mediante a deteção de qualquer deslize do cabo em campanha ou caso a ativação dos mordentes seja inconsistente.

#### 4.5. Cabo de ligação e de controlo da profundidade

Os cabos inclinométricos servem os seguintes propósitos:

- transportar e fornecer energia elétrica aos sensores de medição;
- transportar e retornar o sinal de resposta dos sensores de medição;
- permitir a movimentação do instrumento ao longo do tubo;
- permitir o controlo da profundidade do instrumento no interior do tubo, em função do respetivo passo de leitura (Figura 36, 4.1).

Os cabos inclinométricos operam sob tensão constante e são frequentemente submetidos a esforços de flexão e de torção<sup>1</sup>, pelo que são consideravelmente robustos e geometricamente estáveis. Estes cabos incluem marcas de graduação com inter espaçamento coincidente com o passo de leitura do instrumento (Figura 41) e um ou dois terminais de ligação estanques. As marcas de graduação podem ser metálicas ou de borracha, com ou sem numeração inclusa<sup>2</sup>. Embora hajam elementos de referência para controlo da profundidade adequados a qualquer tipo de cabo, as marcas metálicas destinam-se normalmente à utilização de um copo de apoio e as marcas de borracha adequam-se melhor a um sistema de roldana e mordentes (Figura 40, 4.4).

De um modo geral, a manutenção correta dum cabo inclinométrico inclui:

- proteção dos terminais em dias chuvosos;
- armazenamento em local com baixa humidade relativa;
- lavagem/limpeza e secagem após cada dia de serviço<sup>3</sup>;
- verificação de danos no cabo e reparação atempada dos mesmos<sup>4</sup>;
- proteção dos terminais durante o transporte;
- enrolamento de cabos destacáveis com raio de curvatura alargado<sup>5</sup>;
- manuseamento em local relativamente limpo<sup>6</sup> e sem indução de torção<sup>7</sup>;
- verificação periódica do estado de desgaste das marcas de graduação e reforço das mesmas sempre que necessário<sup>8</sup>;
- proteção da incidência direta de luz solar durante períodos de tempo prolongados.

<sup>1</sup> Por exemplo, durante o desenrolamento e o enrolamento do cabo.

<sup>2</sup> Geralmente, as marcas metálicas contêm a numeração gravada e as marcas de borracha diferenciam-se por duas cores alternadas (in ex.: diferenciação entre profundidades inteiras – 1,0; 2,0; ... *m* – e decimais – 0,5; 1,5; ... *m*). Contudo, é boa política numerar as marcas de borracha para evitar lapsos de contagem por parte dos operadores.

<sup>3</sup> A limpeza do cabo não deve ser descurada, uma vez que a acumulação de detritos acelera o desgaste da blindagem exterior e pode até originar fenómenos de corrosão (in ex.: na presença de agentes alcalinos).

<sup>4</sup> Por exemplo, cortes, dobras acentuadas, perfurações ou zonas com desgaste acentuado.

<sup>5</sup> Por exemplo, com diâmetro superior a 0,5 *m* (SINCO, 2006a).

<sup>6</sup> É frequente que haja uma porção importante de cabo no solo durante a realização de campanhas inclinométricas. Este facto contribui para a agregação de partículas abrasivas no cabo, contribuindo para o desgaste da blindagem exterior.

<sup>7</sup> A torção de cabos elétricos é muito frequente e constitui a principal causa de avaria. Os cabos inclinométricos não são exceção, uma vez que a sua utilização implica vários ciclos de desenrolamento/enrolamento. É importante que os técnicos obtenham formação no sentido de evitar a torção dos mesmos. Na presença de esforços de torção, o cabo deve ser desenrolado na porção necessária, rodado até que os esforços de torção sejam eliminados, e novamente enrolado de forma apropriada (SINCO, 2006a).

<sup>8</sup> Aplicável principalmente a cabos com graduação de borracha.



Figura 41 – Sonda inclinométrica com cabo não destacável de marcas metálicas. Relação entre o passo de leitura, a marcação do cabo e a distância entre rodas.

#### 4.6. Unidades de alimentação elétrica e de aquisição de dados

As unidades de alimentação elétrica e de aquisição de dados podem constituir um ou dois equipamento(s)<sup>1</sup>. Devido à redução de peso dos cabos inclinométricos e das respectivas bobinas de transporte, como também à disponibilização de novas tecnologias de transmissão de dados a baixo custo (in ex.: *Bluetooth* e *WiFi*), a tendência atual concentra-se na separação destas funções em dois equipamentos distintos (Figura 15, 2.4.3):

- a) unidade de alimentação elétrica dos sensores e de transmissão de dados;
- b) unidade de receção, processamento e armazenamento de dados.

A unidade *a)* está normalmente incluída na estrutura da bobina de transporte do cabo inclinométrico, incluindo terminais de ligação para carregamento das baterias e para comunicação direta com o dispositivo.

A unidade *b)* pode constituir um dispositivo comercial ou um telemóvel moderno (in ex.: *smartphone*) com uma aplicação fornecida pelo fabricante.

De um modo geral, estas unidades permitem (Coimbra, 2016):

- definir e armazenar as características de um conjunto limitado de instalações;
- adquirir e armazenar os dados de um conjunto limitado de campanhas inclinométricas;
- consultar os dados e, em alguns dispositivos, os resultados das campanhas armazenadas;
- consultar os parâmetros de qualidade dos dados das campanhas armazenadas (6.3).

Interessa relevar que a coerência dos dados registados deve ser observada durante a execução da campanha (in ex.: através de indicadores de qualidade; 6.3) com introdução de redundância sempre que necessário e possível (in ex.: repetição de leituras). Pois, a redundância de dados em secções de tubo onde se verifiquem anomalias pode evitar a repetição da campanha inclinométrica noutra data e, assim, evitar o aumento de custo associado ao serviço de execução.

As boas práticas de operação e de manutenção destes equipamentos são independentes do tipo de sistema de que se dispõe, compreendendo:

<sup>1</sup> Em equipamentos fixos estas unidades compreendem sempre dispositivos distintos, havendo a possibilidade de armazenar os dados localmente, remotamente, ou de ambas as formas (2.4.2).



- proteção dos terminais em dias chuvosos<sup>1</sup>;
- proteção da incidência direta da luz solar por períodos prolongados;
- limpeza das unidades após cada dia de serviço;
- ausência de choques violentos e de vibrações intensas<sup>2</sup>;
- verificação do nível de carga das baterias<sup>3</sup>, recarregando-as após cada dia de serviço;
- manter a memória limpa, com informação clara e atual<sup>4</sup>.

## 4.7. Verificação e calibração de equipamentos inclinométricos

### 4.7.1. Generalidades

Todo e qualquer instrumento sofre alterações ao longo do tempo que afetam o seu funcionamento<sup>5</sup>, designadamente ao nível da precisão e da exatidão das medições que produz. Portanto, a manutenção dos equipamentos de medição requer a verificação periódica do seu bom funcionamento e, quando necessário, requer a calibração metrológica para assegurar a confiança nos resultados produzidos ao longo dos respetivos períodos de serviço.

Convém começar por distinguir o significado dos termos verificação e calibração (JCGM, 2008a):

- Verificação:** prova objetiva da conformidade de um determinado equipamento relativamente aos requisitos especificados.
- Calibração:** definição da relação entre uma medida padrão e o valor da mesma medida obtido pelo equipamento a calibrar, incluindo as incertezas associadas a cada medição<sup>6</sup>.

O procedimento *a)* é generalizado e não implica, necessariamente, a definição de incertezas nem o recurso a uma medida padronizada. Este procedimento é frequentemente utilizado para verificar a conformidade de processos de execução, a constituição e/ou o estado de conservação de materiais, ou a resposta de dispositivos a determinadas solicitações. Os processos de verificação permitem validar resultados com base em indicadores de avaliação simples e prática. No entanto, não se substituem aos processos de calibração. No que respeita aos inclinómetros, os processos

<sup>1</sup> De um modo geral, com exceção da maioria dos *smartphones*, todas as unidades são impermeabilizadas. Contudo, é sempre boa prática proteger a unidade, mais concretamente no que respeita aos terminais de ligação.

<sup>2</sup> Em unidades recentes, a proteção contra choques e vibrações é mais importante ao nível da alimentação elétrica dos sensores. No entanto, este aspeto tem especial relevância em unidades integradas mais antigas (in ex.: que incorporem a alimentação elétrica e a aquisição de dados num dispositivo), uma vez que se constituem de componentes maiores e mais frágeis.

<sup>3</sup> A operação de inclinómetros com níveis baixos de energia torna os sensores instáveis, podendo traduzir-se num erro de alteração ou de deriva do desvio na origem (6.3.2; 6.4.2; 6.4.5) e/ou no aumento da dispersão nos resultados (6.3.3). Não é boa prática proceder à execução de campanhas inclinométricas com níveis de carga próximos ou abaixo do mínimo indicado pelo fabricante. Algumas unidades incluem a indicação do nível de carga e/ou emitem um alerta de carga insuficiente. Neste sentido, considera-se boa prática a manutenção de um registo de durabilidade, de forma a programar a respetiva substituição atempadamente.

<sup>4</sup> A unidade de aquisição deve ter sempre a data atualizada e estar preparada com a informação correta do serviço a executar. Este procedimento evita edições manuais (in ex.: no campo ou, à posteriori, na sede de trabalho), propensas a erro, e evita incoerências entre a informação existente na base de dados e na unidade de aquisição.

<sup>5</sup> Devido, por exemplo, a fadiga dos materiais de construção, deterioração química dos componentes, histerese dos componentes elétricos induzida por ciclos *on/off*, ou alteração da capacitância dos condensadores.

<sup>6</sup> Note-se que a existência de um padrão de medição implica a definição de incertezas por questões de rastreabilidade (JCGM, 2008a).



de verificação enquadram-se na otimização da calendarização de calibrações (4.7.3.2) e na avaliação qualitativa dos dados inclinométricos (6).

O procedimento *b)* exige a comparação entre os valores medidos pelo equipamento a calibrar e os valores homólogos obtidos de um dispositivo rastreável a um padrão de medição<sup>1</sup>. A relação entre os dois conjuntos de medições é normalmente estabelecida através de uma função que abrange a amplitude de medição do instrumento a calibrar (in ex.: curva de calibração). Esta curva é posteriormente utilizada para afinar o instrumento sob calibração ou para corrigir os valores medidos com o mesmo. Embora a prática possa variar em função do fabricante, verifica-se uma tendência crescente a favor da implementação de procedimentos de correção em sistemas inclinométricos<sup>2,3</sup>.

#### 4.7.2. Verificação de equipamentos inclinométricos

##### 4.7.2.1. Metodologias de verificação de equipamentos inclinométricos

A grande maioria dos inclinómetros é intrinsecamente verificável; ou seja, fornece indicadores que permitem demonstrar o seu correto funcionamento (6.3). No entanto, estes indicadores são incapazes de aferir o estado de calibração dos sensores (in ex.: exatidão), pelo que se torna necessário operar o instrumento num aparato cuja inclinação seja estável e conhecida<sup>4</sup>. As metodologias de verificação inclinométrica mais comuns incluem (ASTM, 2012; Coimbra, 2011; Dunncliff, 1988; ISO 18674-3, 2016; Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000):

- a)* execução de campanhas inclinométricas numa instalação estável;
- b)* análise de dados de obra (6.3);
- c)* secção de tubo com inclinação fixa (Figura 42bc);
- d)* aparato rotativo com inclinação ajustável (Figura 42ac).

O método *a)* consiste na instalação de um tubo inclinométrico para efeitos de verificação metro-lógica. O tubo deve apresentar uma ligeira inclinação relativamente ao plano de referência do instrumento (in ex.:  $1 - 3^\circ$ ) e ter um comprimento mínimo compatível com o indicado nas especificações técnicas do instrumento (in ex.: 25 – 30 m). Na impossibilidade de se proceder à instalação de um tubo com estas características, deve, por motivos de significância estatística, procurar-

<sup>1</sup> Um padrão de medição define-se por uma determinada quantidade, utilizada com referência para medições futuras, caracterizada pelo respetivo valor e pela incerteza de medição que lhe está associada (JCGM, 2008a).

<sup>2</sup> A correção de leituras através de parâmetros de calibração verifica-se principalmente em sistemas com sensores MEMS (2.2.5).

<sup>3</sup> Note-se que a correção de parâmetros de calibração pode ser explícita (Anexo IV) ou implícita (in ex.: incluída no *firmware* do dispositivo e inacessível ao proprietário).

<sup>4</sup> No caso da verificação inclinométrica é mais importante aferir a repetibilidade das medições do que a respetiva exatidão. Pois, a observação inclinométrica baseia-se inteiramente na comparação de desvios calculados em duas datas distintas, sem particular interesse no valor real das inclinações medidas (Dunncliff, 1988). No entanto, a manutenção da exatidão é importante para assegurar a conformidade das medições em instalações com períodos de serviço muito longos (in ex.: mais de cinco anos). Nestes casos, a perda de exatidão (in ex.: devido a derivas excessivas do desvio na origem; 6.3.2) poderá resultar no cálculo de deslocamentos irreais.

se um comprimento mínimo que permita a análise de 30 profundidades<sup>1</sup>. Se houverem condições, o sistema de verificação poderá incluir várias instalações com inclinação variável, de forma a permitir a avaliação do desempenho dos dispositivos ao longo de uma determinada amplitude de medição (in ex.: até 5 – 10°). O procedimento de verificação consiste na execução de campanhas inclinométricas nesse(s) tubo(s) e na manutenção de um histórico de resultados que permita analisar a evolução dos deslocamentos incrementais, dos deslocamentos acumulados e do desvio na origem (5.3; 6.3). Valores que se aproximem, ou que sejam superiores, aos limites de tolerância estabelecidos indicam a necessidade de proceder à calibração do equipamento.

O método *b)* consiste na análise de dados de obra em zonas geotecnicaamente estáveis<sup>2</sup>. Este método poderá apresentar menor fiabilidade relativamente ao método *a)* devido à existência de maior número de variáveis não controladas<sup>3</sup>. A verificação consiste nas análises de qualidade expostas em 6, incluindo a avaliação do desvio na origem. No entanto, convém:

- efetuar uma triagem das instalações capazes de fornecer informação fiável e repetível para efeitos de verificação metrológica;
- incluir o máximo de instalações viáveis para efeitos de verificação metrológica de um determinado equipamento inclinométrico.

Comparativamente ao método *a)*, o método *b)* é mais moroso, requer maior volume de dados e exige maior especialização técnica ao nível da utilização de ferramentas estatísticas. Contudo, permite verificar os equipamentos na amplitude de medição efetivamente utilizada em obra e sem custos acrescidos de instalação.

O método *c)* baseia-se na disposição de um troço de tubo curto (in ex.: 0,6 – 0,8 m) com inclinação fixa (in ex.: 1 – 3°). O tubo pode incluir-se num maciço de betão ou noutro tipo de suporte, desde que lhe seja conferida estabilidade. À semelhança do sugerido para o método *a)*, o suporte pode incluir uma série de troços com inclinações diferenciadas para verificação dos equipamentos ao longo de uma determinada amplitude de medição. O procedimento consiste em obter uma medição (in ex.: duas leituras; 5.1) em cada par de calhas e verificar os valores de inclinação e de desvio na origem (6.3).

O método *d)* consiste na utilização de uma mesa rotativa (Figura 43, 4.7.3) ou de outro aparato com funcionalidade semelhante (Figura 42ac). Normalmente os fabricantes de inclinómetros disponibilizam aparatos deste tipo para verificação dos equipamentos. O procedimento assemelha-se à metodologia *c)*, baseando-se na obtenção de medições, numa ou em várias inclinações e em

---

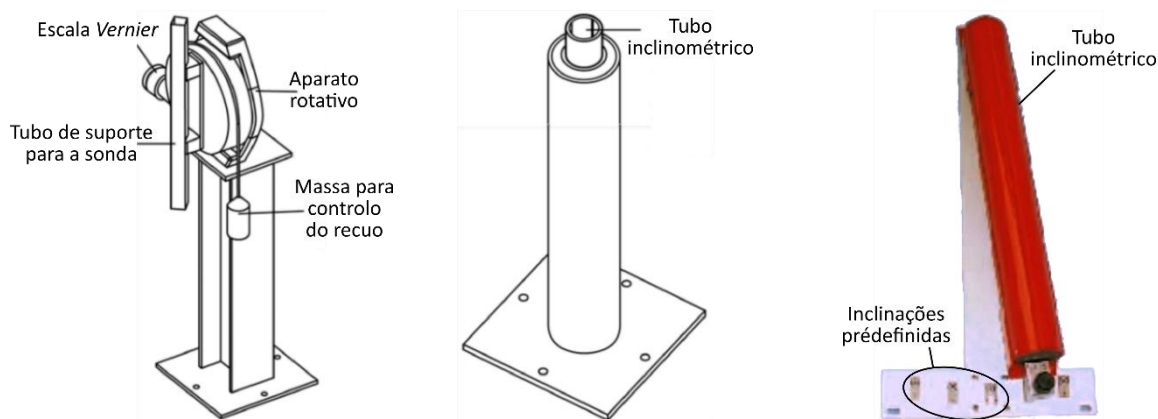
<sup>1</sup> Ou seja, pelo menos 15 m para verificação de instrumentos com passo de leitura de 0,5 m.

<sup>2</sup> Por exemplo, a zona inferior de instalações verticais, inclusa no maciço de encastramento (3.4.6).

<sup>3</sup> Por exemplo, a ocorrência de movimentos, o assoreamento ou a lavagem de detritos na base do tubo.

ambos os planos de medição, com posterior análise dos valores medidos e do desvio na origem.

Para os métodos *a)*, *c)* e *d)*, importa anotar a importância de proceder à verificação de cada conjunto utilizado em obra (in ex.: cabo de ligação, sonda e unidade(s) de alimentação elétrica e de aquisição de dados), sem esquecer a confirmação de níveis de carga adequados (4.6). Pois, qualquer elemento do conjunto pode influenciar as medições inclinométricas.



*a) Aparato rotativo com inclinação variável. b) Aparato com inclinação fixa. c) Aparato com inclinações fixas.*

Figura 42 – Exemplos de aparatos para verificação inclinométrica (adaptado de ASTM, 2012; GEOSYSTEMS, 2010).

#### 4.7.2.2. Frequência de verificação metrológica dos equipamentos inclinométricos

A frequência de verificação metrológica de equipamentos inclinométricos deve estabelecer-se em função da frequência de utilização e do histórico de medições de verificação. Ou seja, quanto maior for a frequência de utilização, maior deve ser a frequência de verificação inicialmente estabelecida<sup>1</sup>, sendo posteriormente reduzida em função do histórico de medições. O objetivo é a deteção atempada de indicadores que justifiquem a calibração dos equipamentos (6.3). Contudo, importa não esquecer que também há outras causas responsáveis pela degradação da qualidade das medições (6.4.7).

Outras razões que justificam a verificação extraordinária dos equipamentos incluem:

- a ocorrência de acidentes durante o manuseamento dos equipamentos;
- a ocorrência sistemática e generalizada<sup>2</sup> de resultados questionáveis<sup>3</sup>;
- a ocorrência esporádica ou sazonal, generalizada<sup>2</sup> ou não, de resultados questionáveis<sup>3</sup>.

Note-se que o diagnóstico de avarias pode ser difícil e requerer persistência. Sempre que esta hi-

<sup>1</sup> Por exemplo, pode estabelecer-se uma frequência inicial de verificação semanal ou mensal, conforme o equipamento tenha mais ou menos de uma utilização diária, respetivamente.

<sup>2</sup> Por exemplo, em todas as obras observadas com um determinado equipamento.

<sup>3</sup> Por resultados questionáveis entende-se resultados incongruentes sem que haja qualquer indicação de erro na análise qualitativa (6), ou, havendo, que seja generalizado à maior parte das medições e sem causa aparente.

pótese é colocada, o processo de verificação deve incluir a permutação de equipamentos com outros homólogos que não apresentem o mesmo comportamento, de forma a testar a totalidade do conjunto (in ex.: sonda, cabo, terminais e unidade de aquisição). Outro aspeto importante mediante a hipótese de avaria é a estanqueidade do sistema, pelo que se deve proceder à verificação dos equipamentos dentro e fora de água<sup>1</sup>. A prazo, a falta de qualidade dos resultados será sempre mais onerosa do que o tempo requerido para o despiste de avarias.

#### **4.7.3. Calibração de equipamentos inclinométricos**

##### *4.7.3.1. Seleção do equipamento de calibração*

A calibração de inclinómetros faz-se normalmente numa mesa rotativa<sup>2</sup> (Figura 43). A precisão, a exatidão e a resolução da mesa devem ser compatíveis com os valores especificados pelo fabricante do inclinómetro, incluindo as incertezas de medição associadas a ambos os dispositivos e a contabilização da deriva metrológica da mesa rotativa durante o respetivo período de serviço entre calibrações. Outras questões a considerar na decisão sobre a aquisição de uma mesa para calibração de inclinómetros incluem (Coimbra, 2011):

- existência de outros instrumentos<sup>3</sup> que possam usufruir do sistema de calibração;
- climatização da área de trabalho (in ex.: humidade e temperatura controladas);
- recurso a pessoal especializado para execução dos serviços de calibração;
- decisão sobre a finalidade última do processo de calibração<sup>4</sup> (in ex.: afinação ou correção);
- condições para proceder à afinação dos equipamentos<sup>5</sup> ou à correção das medições<sup>6</sup>;
- custos associados aos equipamentos necessários e às respetivas calibrações;
- caso se pretenda a acreditação do sistema, custos associados ao processo de acreditação e à manutenção de credenciais.

O processo de calibração é dispendioso e deve ponderar-se em função da despesa inerente ao custo de calibração dos equipamentos de que se dispõe<sup>7</sup>. O custo unitário de calibração externa<sup>8,9</sup> de cada equipamento inclinométrico é estimado em 1.500€ + IVA e o período de serviço ótimo

---

<sup>1</sup> A influência da água das medições nem sempre é perceptível (Anexo X).

<sup>2</sup> *Rotary table*, também conhecida por plataforma rotativa (*rotary stage*) ou por mesa indexante (*indexing table*).

<sup>3</sup> Por exemplo, clinómetros.

<sup>4</sup> A afinação dum instrumento requer intervenção mecânica no mesmo. A correção faz-se por atualização de parâmetros de calibração no *firmware* do instrumento ou no *software* de processamento de dados.

<sup>5</sup> Por exemplo, recurso a pessoal especializado e existência de condições e ferramentas de trabalho adequadas.

<sup>6</sup> Por exemplo, recurso a pessoal especializado, implementação e manutenção de ferramentas informáticas adequadas.

<sup>7</sup> De um modo geral, a implementação de um processo de calibração interna só é compensatória na posse de um número elevado de equipamentos e/ou na perspetiva da comercialização do serviço.

<sup>8</sup> O custo de calibração não inclui o transporte do equipamento, podendo este ser bastante dispendioso.

<sup>9</sup> O custo de calibração baseia-se nas fichas de calibração obtidas até 2011. Valores mais recentes indicam que o custo se tem mantido estável, decrescendo essencialmente pela desvalorização do dólar americano.

entre calibrações é estimado em cerca de 2 anos<sup>1,2</sup> (Coimbra, 2011). Coimbra (2011) efetuou um estudo para o Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) ponderar a aquisição de um equipamento para calibração de inclinómetros. O estudo apresenta critérios para seleção de mesas rotativas com duas finalidades distintas:

- Calibração não certificada: processo interno – obtenção de uma curva de calibração para efeitos de correção das medições inclinométricas.
- Calibração certificada: processo externo – comercialização do serviço<sup>3</sup>.

Atendendo ao histórico de campanhas inclinométricas analisado, Coimbra (2011) conclui que a implementação de um sistema não certificado permitira alargar o período de serviço entre calibrações para mais de 5 anos, sem perda de qualidade, podendo mesmo atingir cerca de 15 anos. No caso de implementação de um sistema certificado, a poupança poderia atingir 100% dos custos de calibração<sup>4</sup>, para além da receita potencial associada à prestação de serviços.

Coimbra (2011) procede a um estudo de mercado e sugere um equipamento de calibração com os requisitos necessários à certificação<sup>5</sup>. Esta opção é fundamentada pela pequena diferença entre os custos de aquisição<sup>6</sup> das mesas selecionadas para cada tipo de sistema de calibração.



a) Mesa de engrenagem sem-fim com controlo manual.

b) Mesa de engrenagem sem-fim com controlo automatizado.

c) Mesas de acionamento direto com controlo automatizado.

Figura 43 – Exemplos de mesas rotativas (adaptado de Aerotech, 2010; Coimbra, 2011; Newport, 2010; RPI, 2010).

<sup>1</sup> Note-se que o período de serviço está relacionado com diversos fatores, designadamente a frequência de utilização, as condições de armazenamento e os cuidados de manuseamento/manutenção (4). Portanto, o período indicado só é válido naquele cenário.

<sup>2</sup> Coimbra (2011) estimou o período de serviço ótimo entre calibrações a partir do histórico de indicadores de qualidade (6.3) de campanhas inclinométricas executadas com diversos inclinómetros. ISO (2016) recomenda o mesmo período de serviço entre calibrações como o máximo a praticar, desde que se acompanhe periodicamente o desempenho metrológico dos equipamentos (4.7.2).

<sup>3</sup> A afinação de instrumentos permanece indefinida por Coimbra (2011), uma vez que a capacidade para o fazer requer um estudo específico sobre as condições necessárias à abertura e montagem dos dispositivos, ou sobre a legalidade e os meios adequados à atualização de parâmetros de calibração no *firmware* de dispositivos digitais (in ex.: MEMS; 2.2.5).

<sup>4</sup> A terminologia “custos de calibração” refere-se apenas ao custo da contratação do serviço, excluindo o custo associado à manutenção e à operação dos equipamentos de calibração.

<sup>5</sup> Independentemente do tipo de sistema a implementar, um equipamento com os requisitos necessários para um sistema de calibração certificado representa menor custo de manutenção, já que oferece tolerâncias de aceitação muito superiores.

<sup>6</sup> A terminologia “custos de aquisição” refere-se apenas ao equipamento necessário (in ex.: mesa, controladores, fonte de alimentação, cablagem e *software*), excluindo outros custos necessariamente aplicáveis e que podem ser mais elevados num sistema de calibração certificado (in ex.: climatização, aparato de suporte e nivelamento, formação e certificação).

As principais características a considerar no processo de seleção de uma mesa rotativa para calibração (in)clinométrica são as seguintes (Coimbra, 2011):

- a) exatidão, repetibilidade e resolução da mesa e dos instrumentos a calibrar;
- b) superfície radial da mesa no plano vertical<sup>1</sup>;
- c) capacidade de carga radial da mesa<sup>2</sup>;
- d) momento de inércia admissível da mesa<sup>3</sup>.
- e) tipo de acionamento mecânico da mesa<sup>4</sup>.

As características do tipo *a*) designam-se por requisitos metrológicos (IPQ, 2005a). É necessário que haja compatibilidade entre os requisitos de ambos os equipamentos. Portanto, os requisitos metrológicos duma mesa para efeitos de calibração inclinométrica devem definir-se em função daqueles requeridos para os inclinómetros. No Quadro 9 apresentam-se os requisitos metrológicos para equipamentos inclinométricos recomendados pelo Comité Técnico 182 da Organização Internacional de Padronização (ISO 18674-3, 2016). No Quadro 20 (6.2.1) apresentam-se especificações técnicas dos principais fabricantes de equipamentos inclinométricos.

Quadro 9 – Requisitos metrológicos para medições inclinométricas (adaptado de ISO 18674-3, 2016).

Portabilidade	Parâmetro	Orientação	
		Vertical	Horizontal
De sonda	Exatidão (aplicável também a instrumentos fixos)	<sup>iv</sup> $\pm 0,02\% FS$	
	<sup>i</sup> Repetibilidade ao longo de 30 m de extensão	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 10 \text{ mm}$
Fixo	<sup>ii</sup> Repetibilidade ao longo de 30 m de extensão	$\pm 2 \text{ mm}$	$\pm 2 \text{ mm}$
De sonda e fixo	<sup>iii</sup> Estabilidade do sinal ao longo de um período de 24 h	$\pm 0,1 \text{ mm/m}$	

NOTA: os valores tabelados referem-se a medições executadas na direção onde as rodas circulam (5.1; 6.2).

<sup>i</sup> Dispersão dos desvios acumulados (5.2) obtidos em  $n$  medições executadas sob condições de repetibilidade (in ex.: mesmo operador, mesmo procedimento, mesmo instrumento e mesma instalação).

<sup>ii</sup> Dispersão dos desvios acumulados (5.2) obtidos em  $n$  medições executadas sob condições de repetibilidade (in ex.: mesmo operador, mesmo procedimento, mesmo instrumento e mesma instalação) e com uma cadeia de segmentos com amplitude de medição de  $\pm 10^\circ$  com 2 m de espaçamento.

<sup>iii</sup> Variação do sinal emitido por um instrumento em posição estática.

<sup>iv</sup> O termo *FS* (*full scale*) refere-se à amplitude máxima de medição do instrumento (in ex.: para amplitude de medição  $FS = \pm 30^\circ$ , a exatidão mínima, ao longo de 1 m, deve ser de  $\pm 30 \times 0,02/100 = \pm 0,006^\circ \Rightarrow 1000 \sin(\pm 0,006^\circ) \cong \pm 0,1 \text{ mm/m}$ ).

A repetibilidade exposta no Quadro 9 refere-se à repetibilidade do sistema e não dos sensores, já que é avaliada para  $n$  medições em profundidade e engloba erros de posicionamento (6.2). É co-

<sup>1</sup> Há mesas que apenas funcionam corretamente com o eixo de rotação paralelo ao plano vertical. Para calibração de inclinómetros verticais é necessário que a mesa tenha capacidade para operar com o eixo de rotação paralelo ao plano horizontal.

<sup>2</sup> A capacidade de carga radial de uma mesa rotativa refere-se à força máxima exercida na direção perpendicular ao eixo de rotação do prato, podendo esta dever-se ao peso acoplado a um prato orientado no plano vertical, à força centrífuga resultante da carga acoplada sob rotação, ou de uma combinação de ambas as situações (Anexo I).

<sup>3</sup> O momento de inércia, ou fletor, refere-se ao momento exercido em direção normal ao eixo de rotação (Coimbra, 2011; Anexo I).

<sup>4</sup> Este fator tem implicações nos custos de aquisição, nos custos de manutenção, na capacidade de automatização e na produtividade de.

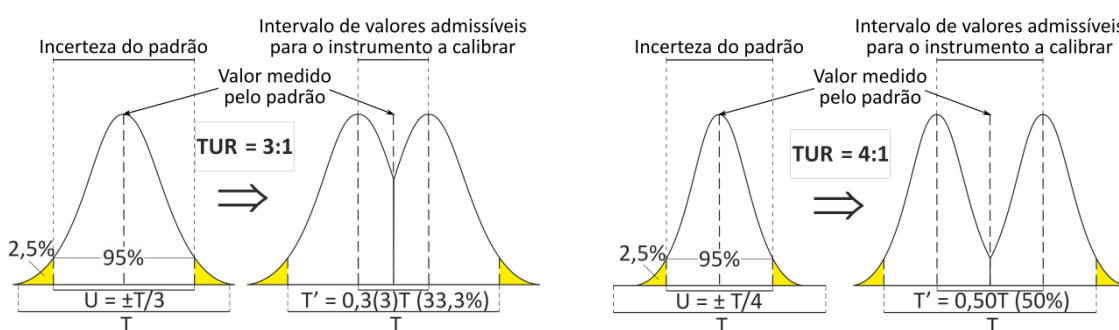
mum os fabricantes especificarem este valor como *system accuracy* e referirem a repetibilidade do sensor separadamente (in ex.: DGSI, 2013c; SOIL, 2014c). A exatidão – *accuracy* – pode ser interpretada como a exatidão do sensor, mas na verdade refere-se ao erro típico do valor médio de duas leituras na mesma posição, uma vez que cada medição inclinométrica resulta da diferença média de duas leituras simétricas (5.1). O termo *accuracy* refere-se frequentemente a uma medida de dispersão (JCGM, 2008a) e será assim tratado neste documento.

A metodologia mais utilizada para avaliação da compatibilidade entre os requisitos metrológicos dum padrão de calibração e dum determinado instrumento a calibrar consiste na determinação do “Coeficiente de Incerteza do Ensaio” (*TUR* - Test Uncertainty Ratio; Bennett & Zion, 2005; Coimbra, 2011; Zion, 2007):

$$TUR = T/U \quad (7)$$

onde  $T$  é a tolerância de aceitação do equipamento sob calibração e  $U$  é a incerteza do processo de medição.

A seleção preliminar de um equipamento de calibração através de um determinado  $TUR$  permite minorar o peso da incerteza de medição que provém desse instrumento, deixando margem para introdução de outras incertezas que provenham doutros fatores<sup>1</sup> ou da deriva do próprio ao longo do tempo. Pois, nem sempre é fácil estimar todas as fontes de incerteza do processo e as respetivas magnitudes. Na figura seguinte ilustra-se a influência que o valor de  $TUR$  tem na tolerância admissível dum ensaio de calibração.



a) Tolerância admissível ( $T'$ ) para um instrumento de tolerância  $T$  calibrado com  $TUR = 3$ .

b) Tolerância admissível ( $T'$ ) para um instrumento de tolerância  $T$  calibrado com  $TUR = 4$ .

Figura 44 – Relação entre a tolerância admissível ( $T'$ ) e a tolerância do equipamento sob calibração ( $T$ ), em função do Coeficiente de Incerteza do Ensaio (*Test Uncertainty Ratio*,  $TUR$ ; adaptado de Coimbra, 2011).

A tolerância de aceitação do equipamento sob calibração ( $T$ ) pode definir-se em função das respetivas especificações técnicas, correspondendo ao dobro da exatidão especificada. Mas, tal co-

<sup>1</sup> Por exemplo, influências doutros aparatos incluídos no sistema, do(s) operadore(s) e doutros fatores ambientais (in ex.: humidade, temperatura e vibrações).

mo já foi referido, a exatidão especificada para inclinómetros de sonda refere-se ao erro aleatório que resulta da diferença média de duas leituras simétricas (6.2), ou, na prática, que resulta da média de duas medições. Portanto, o valor de exatidão a considerar para este tipo de instrumento deve obter-se a partir da equação (8), onde  $\mu$  é o valor médio das medições  $m_1$  e  $m_2$ ,  $u_c$  é a dispersão que caracteriza o erro de  $\mu$  e  $u$  é a dispersão típica de cada medição  $m_i$  (JCGM, 2008b). Considerando o valor de exatidão do Quadro 9 ( $u_c = \pm 0,1 \text{ mm/m}$ ), a tolerância de aceitação para a generalidade dos inclinómetros verticais equivale ao resultado da expressão (9).

$$\mu \pm u_c = (m_1 \pm u + m_2 \pm u)/2 = \mu \pm u/\sqrt{2} \Rightarrow u = \pm u_c \sqrt{2} \quad (8)$$

$$\begin{cases} T \leq 2|u| \\ u[s] = 3600 \sin^{-1}(u/L); u = \pm 0,1\sqrt{2} \text{ mm}; L = 1 \text{ m} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} T \leq 58,34 \text{ s} \\ u \cong \pm 29,170 \text{ s} \end{cases} \quad (9)$$

A estimativa da incerteza a considerar ( $U$ ) pode ser do tipo A ou do tipo B, sendo o primeiro de natureza experimental e o segundo de natureza arbitrária ou fundamentada (in ex.: extraído de especificações; Brown, 2006; Dobbert, 2010; JCGM, 2008b). Na fase de seleção de equipamentos a estimativa de  $U$  é naturalmente do tipo B com contribuição de todas as variáveis disponibilizadas pelo fabricante (in ex.: exatidão, repetibilidade e resolução). No Quadro 10 apresenta-se o método de cálculo utilizado por Coimbra (2011) para proceder à estimativa de  $U$  a partir das especificações metrológicas das mesas rotativas analisadas.

Quadro 10 – Método de cálculo para estimativa da incerteza de medição introduzida pelo equipamento de calibração (adaptado de Coimbra, 2011).

Variável	Cálculo	Observações
Incerteza expandida:	$U = ku_c; k = 2$	$k$ – coeficiente de expansão ( $k = 2$ ; 95%; JCGM, 2008b)
Incerteza combinada:	$u_c = \sqrt{u_{ex}^2 + u_{rep}^2 + u_{res}^2}$	(JCGM, 2008b)
Incerteza associada à exatidão do instrumento:	$u_{ex} = \frac{E_x}{\sqrt{3}}$	$E_x$ – exatidão especificada; distribuição retangular com 50% de probabilidade relativamente à ocorrência de $\pm E_x$ (JCGM, 2008b).
Incerteza associada à repetibilidade do instrumento:	$u_{rep} = \frac{R_p}{2}$	$R_p$ – repetibilidade especificada; dispersão de $n$ medições assumindo que $R_p$ está afetado de um coeficiente de expansão de 95% ( $R_p = k\sigma$ ; $k = 2$ ; JCGM, 2008b).
*Incerteza associada à resolução do instrumento:	$u_{res} = \frac{R_s}{2\sqrt{3}}; R_s = 1 \text{ s}$	$R_s$ – resolução especificada; distribuição retangular com 50% de probabilidade para o valor medido se situar entre duas unidades de resolução consecutivas (in ex: $\pm R_s/2$ ; JCGM, 2008b)

\*Devido à inclusão de codificadores óticos e de multiplicadores de escala, os equipamentos oferecem resoluções muito superiores à sua exatidão e repetibilidade. Por esta razão foi considerado o valor mínimo de 1 s para todos os dispositivos, o que corresponde a 1/4 da resolução da generalidade dos instrumentos inclinométricos.

Conhecido o valor de  $T$  do sistema inclinométrico a calibrar e o valor de  $U$  de cada padrão de calibração considerado, a ponderação consiste na exclusão dos equipamentos que apresentam valor de  $TUR$  insuficiente, procedendo-se posteriormente à avaliação dos custos de aquisição e de ma-



nutenção dos equipamentos restantes. Sabendo que o valor de  $TUR$  oscila normalmente entre 3 e 10 (IPAC, 2010; IPQ, 2005b, 2005a, 1996; ISO & IEC 17025, 2017), Coimbra (2011) opta<sup>1</sup> por definir valores mínimos de  $TUR \geq 6$  para um sistema de calibração certificado e de  $TUR \geq 4$  para um sistema de calibração não certificado. Desta forma, para o valor de exatidão  $u_c = \pm 0,1 \text{ mm/m}$  (Quadro 9) e para a tolerância  $T$  obtida em (9), a incerteza máxima a procurar numa mesa rotativa deverá situar-se no intervalo:

$$TUR \geq T/U; 4 \leq TUR \leq 6; T = 58,34 \text{ s} \Rightarrow \pm 9,7 \text{ s} \leq U \leq \pm 14,6 \text{ s} \quad (10)$$

Coimbra (2011) apresenta as estimativas expostas no quadro seguinte relativamente às características da mesa *b)*, *c)* e *d)*.

Quadro 11 – Grandezas estimadas para os principais requisitos não metrológicos de uma mesa rotativa para execução de calibrações inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2011).

Variável	Valor
Superfície radial ( <i>b</i> ):	<ul style="list-style-type: none"> <li>A superfície radial deve considerar-se em função do diâmetro perfurado, já que algumas mesas incorporam pratos de apoio e outras não. O diâmetro perfurado influencia a estabilidade da carga, a facilidade do seu acoplamento e a forma como o próprio momento fletor é exercido.</li> <li>Coimbra (2011) apresenta mesas com diâmetros perfurados entre 101 e 164 <i>mm</i>. A seleção final incorpora diâmetros perfurados de 164 e de 150 <i>mm</i>, correspondendo o último à recomendação final.</li> </ul>
Capacidade de carga radial ( <i>c</i> ):	<ul style="list-style-type: none"> <li>Massa total estimada: 10 <i>kg</i> (Anexo I).</li> </ul>
Momento de inércia ou fletor ( <i>d</i> )*:	<ul style="list-style-type: none"> <li>Momento de inércia estimado: 0,5 <i>kg · m²</i> (Anexo I).</li> <li>Momento fletor estimado: 10 <i>N · m</i> (Anexo I).</li> </ul>

\*Estimado para uma distância máxima de 10 *cm* entre a superfície da mesa e o centro gravítico da carga.

Relativamente ao tipo de acionamento mecânico da mesa (*e*), Coimbra (2011) sugere os tipos *acionamento direto*<sup>2</sup> e *engrenagem sem-fim*<sup>3</sup> como os mais adequados para esta finalidade (Figura 43). As vantagens e as desvantagens de ambas as tipologias encontram-se descritas no Quadro 12.

<sup>1</sup> Coimbra (2011) refere que o valor mínimo  $TUR = 3$  pode fornecer margens de segurança irrealistas, uma vez que só considera um lado da curva de dispersão que caracteriza a incerteza  $U$ . Bennett & Zion (2005) sugerem  $TUR \geq 4$ . Zion (2007) sugere a aplicação de um coeficiente de expansão da incerteza combinada superior ao valor comumente utilizado ( $k = 2$ ; JCGM, 2008b), de forma a garantir a cobertura total da curva que caracteriza a dispersão da incerteza de medição ( $k \geq 3,9$ ; JCGM, 2008b). Garcia et al. (2009) expandem  $U$  com um coeficiente  $k = 2$ , o que, na prática, equivale a considerar ambos os lados da distribuição que caracteriza a incerteza da medição ( $TUR \geq T/(2U) \Leftrightarrow TUR \geq 6$ ).

<sup>2</sup> O acionamento faz-se por indução magnética, encontrando-se o motor incorporado na própria mesa sem qualquer engrenagem.

<sup>3</sup> O motor dispõe de um rotor com determinado passo (rosca sem-fim) que aciona a mesa através da respetiva engrenagem periférica.

Quadro 12 – Vantagens e desvantagens dos tipos de acionamento mecânico mais adequados para um sistema de calibração inclinométrica (adaptado de Coimbra, 2011).

Acionamento	Vantagens	Desvantagens
Direto (indução magnética)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sem manutenção;</li> <li>• sem desgaste;</li> <li>• <sup>i</sup>sem recuo;</li> <li>• melhor controlo sobre o movimento;</li> <li>• <sup>ii</sup>melhor exatidão e repetibilidade.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <sup>iii</sup> Maior dificuldade na manipulação de cargas elevadas e/ou perante a ocorrência de momentos de inércia ou angulares consideráveis;</li> <li>• <sup>iv</sup> maior incerteza relativamente à exatidão atingível nas condições do ponto anterior.</li> </ul>
Engrenagem sem-fim	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor aumento de custo para capacidades de carga superiores com momentos de inércia ou de flexão consideráveis;</li> <li>• liberdade de opção sobre o tipo de motor a implementar;</li> <li>• exatidão garantida, desde que o equipamento seja operado de acordo com as capacidades de carga especificadas.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <sup>lv</sup>Recuo;</li> <li>• níveis de exatidão muito elevados requerem a aquisição de unidades maiores e com maior capacidade de carga;</li> <li>• desgaste da engrenagem (in ex.: maior frequência de manutenção e de calibração).</li> </ul>

<sup>i</sup>O recuo (*backlash*) caracteriza-se por um erro de medição/posicionamento aquando da mudança no sentido de progressão das medições/movimentos. Esta divergência deve-se à folga existente na engrenagem para fins de lubrificação e de tolerância de fabrico.

<sup>ii</sup>Embora as mesas com *acionamento direto* tenham normalmente melhores características metrológicas, convém salientar que o desempenho está mais dependente do tipo de aplicação (in ex.: magnitude e distribuição da carga).

<sup>iii</sup>O custo deste tipo de mesa sobe abruptamente nestas condições de aplicação.

<sup>iv</sup>Neste tipo de mesa, a exatidão só se pode aferir após afinação com a respetiva carga.

<sup>v</sup>O recuo é importante para verificação da histerese em inclinómetros. Neste caso deve considerar-se a repetibilidade bidirecional para efeitos de estimativa de *U* (Quadro 10).

#### 4.7.3.2. Frequência de calibração metrológica dos equipamentos inclinométricos

Não existe uma regra universal para estabelecer um período de serviço entre calibrações de um determinado instrumento (Coimbra, 2016, 2011; ILAC & OIML, 2007). Na ausência de rotinas de verificação metrológica ou funcional (4.7.2; 6.2; 6.3), o período de serviço inicial deverá estabelecer-se em função das recomendações do fabricante ou com base na experiência e no conhecimento comportamental de instrumentos semelhantes (ILAC & OIML, 2007). Note-se que o tipo de sensor (2.2) é determinante para a definição do período de serviço entre calibrações, uma vez que cada tipo de sensor tem características próprias<sup>1</sup>. Portanto, a informação comportamental obtida para determinado instrumento não se aplica a outro que possua um tipo de sensor distinto, ainda que ambos os instrumentos tenham as mesmas características mecânicas, especificações metrológicas semelhantes, sejam utilizados no mesmo ambiente e segundo os mesmos procedimentos.

O período de serviço entre calibrações pode e deve ser ajustado após o primeiro ciclo (in ex.: 1 a 2 anos). Este procedimento permite otimizar os custos de manutenção em função do tipo de utilização e das características instrumentais de cada, ou de um grupo de, equipamento(s). ILAC & OIML (2007) referem os métodos seguintes para ajuste dos períodos de serviço entre calibrações:

a) Ajuste automático: o período de serviço é alargado ou reduzido conforme o resultado da

<sup>1</sup> Por exemplo, propensão à deriva do desvio, linearidade, resistência ao choque ou degradação da precisão por deterioração de componentes eletrónicos e/ou mecânicos.

calibração demonstre, respetivamente, que o instrumento opera dentro ou fora de 80% da tolerância admissível.

- b) Gráficos de controlo: é mantido um histórico de resultados de calibração, sobre o qual se procede a uma análise estatística da deriva instrumental ao longo do tempo. A base de dados resultante permite calcular o período de serviço ótimo para as condições em que os instrumentos são utilizados, podendo o mesmo período aplicar-se a outros instrumentos semelhantes que operem nas mesmas condições.
- c) Tempo de uso: é atribuído um tempo de uso a cada instrumento, procedendo-se à respetiva calibração assim que esse tempo expire. O tempo de uso atribuído pode definir-se através de qualquer outro método.
- d) Verificação em serviço: certos parâmetros são frequentemente verificados e o instrumento é enviado para calibração quando se verifica a ocorrência de algum parâmetro fora do intervalo de confiança.
- e) Outros métodos estatísticos: os instrumentos são avaliados através de métodos estatísticos adequados a cada, ou ao tipo de, instrumento.

Os métodos *a)* e *b)* só são aplicáveis quando o laboratório de calibração fornece o resultado das medições de verificação, ou a curva de calibração, anterior(es) à afinação do instrumento. No caso dos inclinómetros, normalmente calibrados pelo respetivo fabricante ou por um representante autorizado, a experiência revela que não é esta a prática. Pois, os certificados de calibração inclinométrica apenas incluem as medições de verificação pós-afinação.

O método *c)*<sup>1</sup> pode aplicar-se com ou sem resultados de medições pré-afinação. No entanto, não é recomendável para instrumentos propensos a deriva do desvio durante o armazenamento, como é o caso dos inclinómetros. Apesar desta restrição, admite-se que pode ser uma boa opção para inclinómetros fixos (2.2.4) que não tenham utilização intermitente<sup>2</sup>.

O método *d)* corresponde à verificação periódica do desvio na origem, segundo os métodos *c)* e *d)* apresentados em 4.7.2 (Figura 42, 4.7.2.1). Contudo, importa referir que a própria definição deste método implica uma frequência de verificação muito elevada (in ex.: diária ou após cada serviço). No contexto de instrumentos inclinométricos, essa frequência de verificação é desnecessária porque há necessariamente uma grande quantidade de dados intrinsecamente verificáveis<sup>3</sup> (6).

O método *e)* inclui-se nos procedimentos de verificação *a)* e *b)* referidos na secção 4.7.2 e discutidos mais detalhadamente em 6. Na ausência de equipamentos capazes de providenciar verificações inclinométricas dentro dos intervalos de confiança admissíveis (4.7.3.1), este é o método que

---

<sup>1</sup> Note-se que em inclinómetros de sonda (2.4.3) este método deve basear-se em metros de tubo medido e não no tempo de uso.

<sup>2</sup> Por utilização intermitente entende-se a aplicação temporária destes dispositivos e a sua relocalização sem entretanto se proceder à sua calibração (in ex.: na observação de escavações temporárias).

<sup>3</sup> Ou seja, qualquer desvio comportamental é facilmente detetado se houverem rotinas de análise de qualidade incluídas nos procedimentos de tratamento de dados.

melhor se adequa ao ajuste dos períodos de serviço entre calibrações de inclinómetros de sonda (2.4.3). Caso contrário pode aplicar-se o método *d)*, com uma frequência de verificação mais moderada (4.7.2.2) e complementarmente à inclusão de procedimentos de avaliação da qualidade das medições inclinométricas nas rotinas de trabalho (6). Pois, para além de garantirem a fiabilidade dos resultados, aqueles procedimentos fornecem um histórico comportamental dos instrumentos em ambiente de obra e permitem avaliar parâmetros de dispersão de causa não sensorial (in ex.: relacionados com as rodas e/ou com características específicas de cada instalação).

Apesar do método *e)* parecer o mais adequado, não é normalmente aplicado por falta de pessoal especializado e/ou de ferramentas de análise. A prática mais comum é definir um período de serviço fixo em função das recomendações do fabricante e independentemente do padrão de utilização do instrumento. Em certos casos (in ex.: em situações de insuficiência financeira) pode até ocorrer que os instrumentos sejam continuamente utilizados mediante a obtenção de resultados coerentes com o comportamento de obra esperado. Coimbra (2016) resume as práticas mais utilizadas para definir a periodicidade de calibração inclinométrica, juntamente com a metodologia *e)*, e tece algumas observações que se apresentam no Quadro 13. Note-se que apenas o método *e)* permite otimizar os períodos de serviço dos equipamentos sem perda de confiança no respetivo desempenho instrumental.

Quadro 13 – Metodologias normalmente utilizadas para a definição da periodicidade de calibração de instrumentos inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2016).

Método	Observações
Calibração em função de um período de serviço fixo:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• É definido um período de tempo fixo entre calibrações;</li> <li>• o período pode definir-se em função do tempo de vida útil, do tempo de operação, da frequência de utilização ou das recomendações do fabricante;</li> <li>• quando não é combinado com a análise de parâmetros de qualidade, pode resultar em períodos demasiadamente curtos, aumentando os custos de manutenção, ou demasiadamente longos, reduzindo a confiança nos resultados inclinométricos.</li> </ul>
Calibração devido à obtenção de valores sistematicamente duvidosos:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Resulta sempre em períodos de serviço demasiadamente longos;</li> <li>• coloca em causa a qualidade/fiabilidade dos resultados inclinométricos e pode condicionar a continuidade das observações inclinométricas;</li> <li>• pode contribuir para a redução do tempo de vida útil dos instrumentos;</li> <li>• o custo associado à repetição de campanhas inclinométricas é potencialmente superior à poupança gerada pelo alargamento do período de serviço.</li> </ul>
Calibração devido à obtenção de indicadores de qualidade no limiar ou fora dos respetivos limites de confiança:	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Obriga a uma rotina de controlo da qualidade dos dados inclinométricos;</li> <li>• resulta sempre num período de operação otimizado para cada instrumento, considerando as condições em que o mesmo opera;</li> <li>• quando instrumentos do mesmo tipo (in ex.: com o mesmo sensor) operam sistematicamente em condições semelhantes, é possível definir um período de serviço adequado com base no padrão de evolução dos parâmetros de qualidade.</li> </ul>

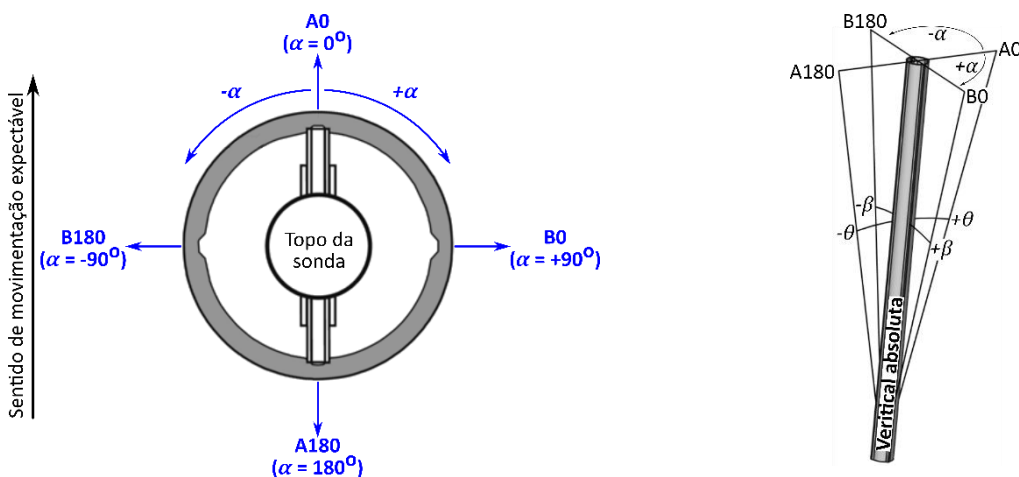


## 5. PROCESSAMENTO DE DADOS INCLINOMÉTRICOS

### 5.1. Conceitos fundamentais

Os dados inclinométricos consistem em  $n$  medições de inclinação ao longo de um eixo, tendo por objetivo o cálculo dos respetivos segmentos de reta perpendiculares ao plano de referência do instrumento (Figura 1, 1; Figura 36, 4.1). Para a grande maioria dos inclinómetros, cada medição envolve duas leituras simétricas (in ex.: uma campanha requer duas sequências de leitura com a sonda orientada em sentidos opostos<sup>1</sup>). Neste contexto, o termo leitura refere-se a uma leitura isolada ((11), (12)) e o termo medição refere-se à diferença média entre duas leituras simétricas obtidas na mesma secção da instalação e na mesma campanha de observação ((13), (14)).

Na Figura 16 (3.2.1) apresenta-se um esquema representativo da relação entre os planos  $A$  e  $B$  e as calhas inclinométricas. Na Figura 24 (3.4.5) apresenta-se um esquema de alinhamento e de identificação das calhas em obra, sendo a direção  $A$ , ou *Principal*, coincidente com aquela em que se espera o desenvolvimento de deslocamentos. Na Figura 38 (4.3.1) apresenta-se a relação entre as rodas inclinométricas e os sentidos de inclinação positivo e negativo. Na Figura 45a apresenta-se um esquema dum tubo inclinométrico visto em planta, onde se inclui a identificação<sup>2</sup> das quatro calhas de rodagem  $A0$ ,  $A180$ ,  $B0$  e  $B180$ , situando-se  $B0$  sempre a  $90^\circ$  de  $A0$  no sentido horário. Na Figura 45b ilustra-se a relação entre cada sentido de medição, a orientação azimutal dos deslocamentos ( $\alpha$ , 5.4) e os sinais dos ângulos medidos nos planos  $A$  ( $\theta$ ) e  $B$  ( $\beta$ ).



a) Relação entre os sentidos de medição e o sinal da orientação azimutal dos deslocamentos (5.4). b) Relação entre os sentidos de medição e os sinais dos ângulos medidos nos planos  $A$  e  $B$ .

Figura 45 – Sentidos de medição inclinométrica e respetiva relação com a orientação azimutal dos deslocamentos e com os sinais dos ângulos medidos nos planos  $A$  e  $B$  (adaptado de Coimbra, 2016; SINCO, 2006a).

<sup>1</sup> São necessárias quatro sequências para inclinómetros unidireccionais não oblíquos e apenas uma para inclinómetros oblíquos (2.3).

<sup>2</sup> Outras designações utilizadas para os sentidos  $A0$ ,  $A180$ ,  $B0$  e  $B180$  são, respetivamente,  $A1$ ,  $A2$ ,  $B1$  e  $B2$ , ou  $A +$ ,  $A -$ ,  $B +$  e  $B -$ .

Os sensores inclinométricos debitam um sinal em função do seno do ângulo de inclinação (Dunnicliff, 1988; Mikkelsen, 2003). Na Figura 46 apresenta-se a resposta sensorial típica de um acelerômetro inercial, em função da inclinação da sonda inclinométrica. A resposta ideal seria nula em condição de alinhamento perfeito da sonda com o plano de referência instrumental (in ex.: 0°), mas observa-se um ligeiro desfasamento entre o valor ideal e a resposta obtida naquelas condições. Esse desfasamento denomina-se desvio na origem (*bias*) e corresponde a um erro sistemático que se traduz na translação integral da curva de resposta. O desvio na origem está sempre presente em qualquer instrumento, independentemente da respetiva condição metrológica. No caso dos inclinómetros este valor não pode ser corrigido através de uma constante; pois varia ao longo do tempo e mediante as condições de operação (6.3; 6.4.2; Figura 91, 6.4.5). Esta é a razão para a necessidade de se proceder a duas sequências de leituras por cada sequência de medições. Pois, por muio pequeno que seja o desvio na origem, os procedimentos de cálculo para produção de resultados multiplicam a sua influência a cada iteração (5.2; 5.3; 6).

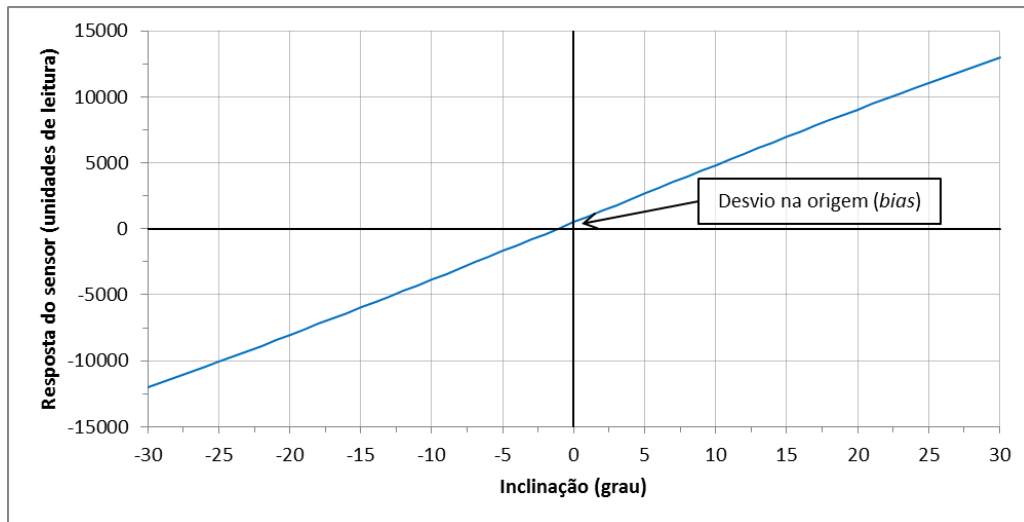


Figura 46 – Resposta de um sensor inclinométrico em função da inclinação da sonda na respetiva direção.

A relação entre os valores de leitura e o seno do ângulo obtém-se através das equações (11) e (12), para os planos A e B, respetivamente, onde  $l_i^{A0}$ ,  $l_i^{A180}$ ,  $l_i^{B0}$  e  $l_i^{B180}$  são as leituras obtidas nos sentidos A0, A180, B0 e B180, respetivamente, às quais correspondem os ângulos  $\theta_i^0$ ,  $\theta_i^{180}$ ,  $\beta_i^0$  e  $\beta_i^{180}$ , respetivamente, sendo  $b$  o desvio na origem de cada sensor e  $k$  uma constante de proporcionalidade específica de cada modelo de inclinómetro (Quadro 14).

$$\begin{cases} l_i^{A0} = k \sin \theta_i^0 + b_A \\ l_i^{A180} = k \sin \theta_i^{180} + b_A \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sin \theta_i^0 = \frac{l_i^{A0} - b_A}{k} \\ \sin \theta_i^{180} = \frac{l_i^{A180} - b_A}{k} \end{cases}; \theta_i^0 = -\theta_i^{180} \quad (11)$$

$$\begin{cases} l_i^{B0} = k \sin \beta_i^0 + b_B \\ l_i^{B180} = k \sin \beta_i^{180} + b_B \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \sin \beta_i^0 = \frac{l_i^{B0} - b_B}{k} \\ \sin \beta_i^{180} = \frac{l_i^{B180} - b_B}{k} \end{cases}; \beta_i^0 = -\beta_i^{180} \quad (12)$$

Sabendo-se que os ângulos  $\theta_i^0$  e  $\theta_i^{180}$ , tal como os ângulos  $\beta_i^0$  e  $\beta_i^{180}$ , são simétricos, as medições em cada plano ( $m_i$ ) correspondem à diferença média das respetivas leituras, de acordo com as equações (13) e (14), para os planos A e B, respetivamente, onde se verifica a eliminação efetiva do desvio na origem.

$$m_i^A = \frac{l_i^{A0} - l_i^{A180}}{2k} = \frac{\sin \theta_i^0 + b_A - (\sin \theta_i^{180} + b_A)}{2} = \sin \theta_i; \theta_i^0 = -\theta_i^{180} \quad (13)$$

$$m_i^B = \frac{l_i^{B0} - l_i^{B180}}{2k} = \frac{\sin \beta_i^0 + b_B - (\sin \beta_i^{180} + b_B)}{2} = \sin \beta_i; \beta_i^0 = -\beta_i^{180} \quad (14)$$

Quadro 14 – Constantes de proporcionalidade ( $k$ ) dos principais fabricantes de inclinómetros (GEOKON, 2009b, adaptado de 2014a, 2014b; RST, 2010; SINCO, 2006a, 2014; SISGEO, 2013a; SOIL, 2014d, 2014e).

Fabricante	Modelo	Sensores	$k$
Slope Indicator Company (SINCO)	Digitilt Classic (50302599)	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	<sup>i</sup> 25000
			<sup>ii</sup> 20000
	Digitilt AT System (50330999)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	<sup>iii</sup> 100000
Soil Instruments (SOIL)	Vert. Digital Inclinom. Sys. (C17)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	<sup>iv</sup> 50000
	Digital Inclinometer Pro (C17 Pro)		<sup>iv</sup> 100000
RST Instruments	MEMS Digital Inclinometer System	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	<sup>v</sup> 25000
SISGEO	Vertical Inclinometer Probe	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	20000
	Digital MEMS Inclinometer System	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	
GEOKON	Inclinometer Probe (6000)	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	<sup>i, vi</sup> 25000
			<sup>ii, vi</sup> 20000
	MEMS Inclinometer Probe (6100)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	<sup>i, vii</sup> 25000
			<sup>ii, vii</sup> 20000

NOTA: todos os instrumentos são portáteis com plano de referência vertical. As constantes para instrumentos portáteis de referência horizontal deverão ser idênticas, uma vez que os sensores são normalmente do mesmo tipo e as unidades de leitura são permutáveis.

<sup>i</sup>Aplicável ao sistema métrico.

<sup>ii</sup>Aplicável ao sistema imperial.

<sup>iii</sup>Esta é a constante de armazenamento interno. Durante a obtenção de dados, os valores de leitura são apresentados com constante 25000 ou 20000, conforme o sistema seja métrico ou imperial, respetivamente.

<sup>iv</sup>Esta é a constante de armazenamento interno. Durante a obtenção de dados, os valores de leitura são apresentados em unidades de medida (in ex.: milímetros ou polegadas de desvio relativamente ao plano de referência do instrumento; 5.2).

<sup>v</sup>Este equipamento apresenta e armazena as leituras em unidades métricas ou imperiais, mas permite a exportação de dados com constante 25000 para compatibilização com sistemas da SINCO.

<sup>vi</sup>As constantes obtiveram-se da unidade de leitura GK-603 (GEOKON, 2009b). O manual do produto apenas refere a necessidade de uma unidade de alimentação/aquisição capaz de medir  $\pm 5 V$  em  $\pm 30^\circ$  com uma resolução de 0,5 mV.

<sup>vii</sup>As constantes obtiveram-se da unidade de leitura GK-603 (GEOKON, 2009b). O manual do produto apenas refere a necessidade de uma unidade de alimentação/aquisição capaz de medir  $\pm 4 V$  em  $\pm 30^\circ$  com uma resolução de 0,5 mV.



As medições  $m_i$  utilizam-se para produção de resultados de observação de movimentos transversais (5.3; 5.4; 5.6; 5.9). Estes resultados são normalmente processados de forma automática e formam a base necessária para proceder à análise crítica. Contudo, a qualidade da informação gerada depende sempre da qualidade dos dados obtidos, cuja análise requer a observação direta das leituras  $l_i^0$  e  $l_i^{180}$  (6).

## 5.2. Desvios incrementais e acumulados

O ponto de partida para a produção de resultados inclinométricos é o cálculo dos segmentos transversais ao plano de referência do instrumento (Figura 1, 1). Estes segmentos denominam-se desvios incrementais ( $d_i$ ) e obtêm-se em função do passo de leitura ( $L$ ) e dos senos dos ângulos medidos em cada secção do eixo instrumentado ((13), (14), 5.1):

$$\begin{cases} d_i^A = Lm_i^A = L \sin \theta_i \\ d_i^B = Lm_i^B = L \sin \beta_i \end{cases} \quad (15)$$

Em instrumentos portáteis, o passo de leitura é normalmente 0,5 m no sistema métrico e 2 ft no sistema imperial. Instrumentos fixos têm passos de leitura variáveis e ajustáveis (2.4.2)<sup>1</sup>.

A integração dos desvios incrementais ( $d_i$ ) desde um ponto de referência da instalação ( $i$ )<sup>2</sup> até uma determinada secção ( $j$ ) denomina-se desvio acumulado ( $D_j$ ):

$$\begin{cases} D_j^A = \sum_i^j d_i^A = L \sum_i^j m_i^A \\ D_j^B = \sum_i^j d_i^B = L \sum_i^j m_i^B \end{cases} \quad (16)$$

com  $d_0 = 0$  em instalações cujo ponto de referência é considerado fixo<sup>3</sup>.

O perfil do eixo instrumentado corresponde à totalidade dos desvios acumulados e denomina-se geometria da instalação inclinométrica (Figura 1, 1). Nas figuras 47 e 48 apresenta-se um exemplo dos desvios incrementais e da geometria de uma instalação inclinométrica, respetivamente.

A geometria das instalações é importante porque permite identificar:

- a inclinação máxima, tendo esta influência na performance dos instrumentos (5.10; 6.2; 6.4.3; 6.4.5);
- alterações significativas de inclinação, podendo estas diminuir o tempo de vida útil respetivo (5.8.3) ou potenciar a ocorrência futura de erros pontuais (6.4.7);
- a ocorrência de erros sistemáticos generalizados (6.4.3; 6.4.4; 6.4.5).

<sup>1</sup> Note-se que os instrumentos fixos também implicam métodos de cálculo distintos devido ao tipo de sensor que incorporam.

<sup>2</sup> Por exemplo, a base do tubo em instalações verticais destinadas à observação da estabilidade de taludes.

<sup>3</sup> Nestas condições a apresentação gráfica de resultados parte normalmente de um passo de leitura anterior à primeira secção medida, atribuindo-se valor nulo aos desvios respetivos.

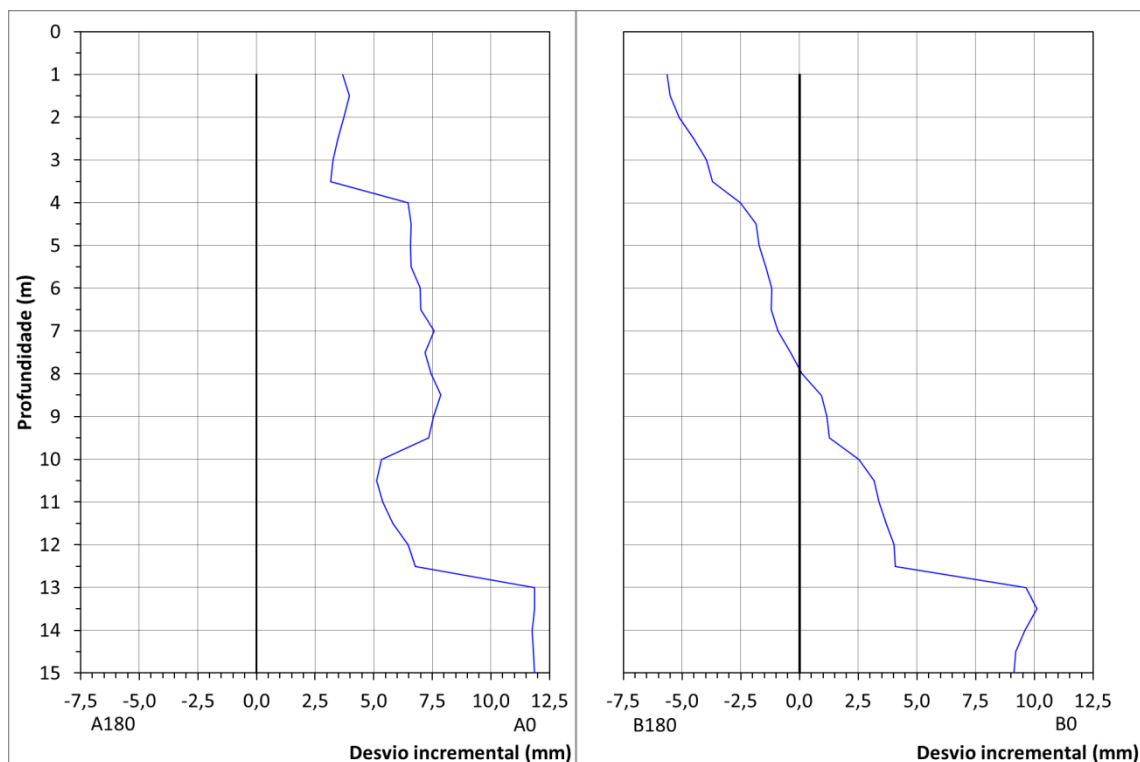


Figura 47 – Desvios incrementais de uma instalação inclinométrica nas direções *A* e *B*.

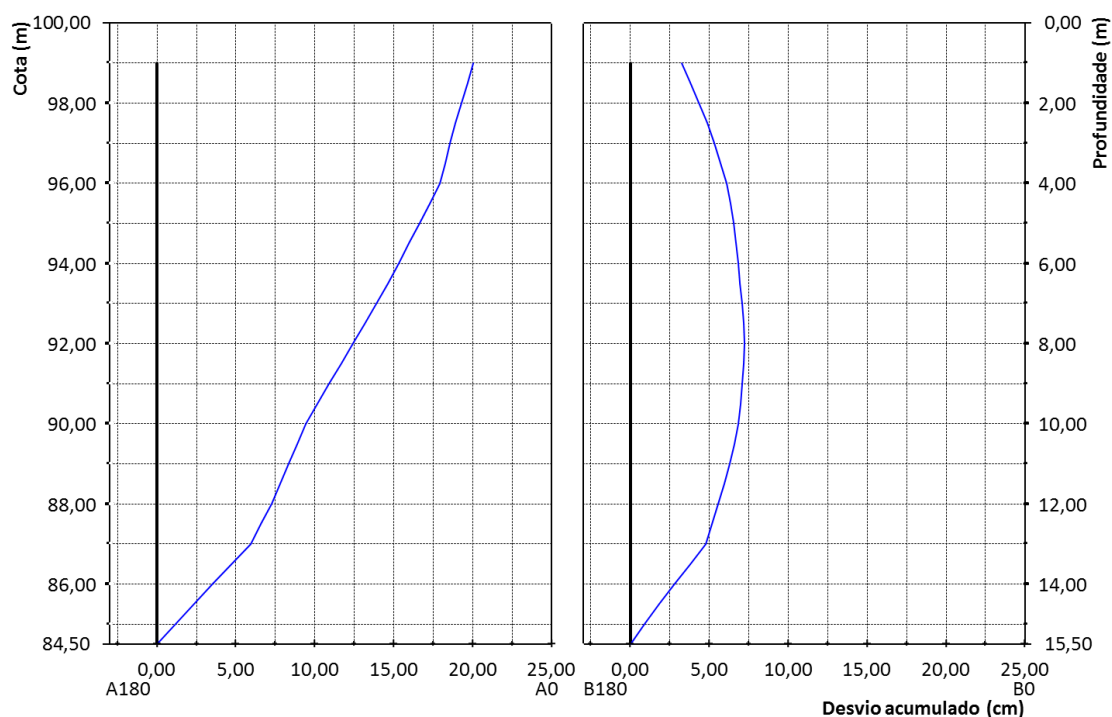


Figura 48 – Geometria de uma instalação inclinométrica nas direções *A* e *B* (adaptado de Coimbra, 2016).

### 5.3. Deslocamentos incrementais e acumulados

A observação dos movimentos internos consegue-se por comparação de desvios obtidos em duas campanhas distintas, estabelecendo-se uma campanha de referência relativamente à qual todas as campanhas seguintes são comparadas (4.2).

As diferenças entre os desvios incrementais ( $d_i$ ) de uma campanha ordinária  $p$  e da respetiva campanha de referência  $r$  denominam-se deslocamentos incrementais ( $\Delta d_{p,i}$ ):

$$\begin{cases} \Delta d_{p,i}^A = d_{p,i}^A - d_{r,i}^A \\ \Delta d_{p,i}^B = d_{p,i}^B - d_{r,i}^B \end{cases} \quad (17)$$

Da mesma forma, as diferenças entre os desvios acumulados ( $D_j$ ) de uma campanha ordinária  $p$  e da respetiva campanha de referência  $r$  denominam-se deslocamentos acumulados ( $\Delta D_{p,j}$ ):

$$\begin{cases} \Delta D_{p,j}^A = D_{p,j}^A - D_{r,j}^A \\ \Delta D_{p,j}^B = D_{p,j}^B - D_{r,j}^B \end{cases} \quad (18)$$

Os deslocamentos incrementais são úteis para análise isolada de superfícies com movimento ativo, principalmente quando a espessura de distorção (5.8) é pequena e/ou em situações em que a qualidade dos dados influencia os deslocamentos acumulados de forma significativa (6).

Os deslocamentos acumulados permitem avaliar a totalidade do deslocamento ocorrido e, consequentemente, a espessura de terreno em movimento.

Nas próximas figuras apresenta-se um exemplo de deslocamentos incrementais (Figura 49) e de deslocamentos acumulados (Figura 50) nas direções  $A$  e  $B$ . Nestas figuras observa-se a relação entre a movimentação do terreno e a transição litológica, evidenciando-se também o tipo de in- formação que estes resultados fornecem.

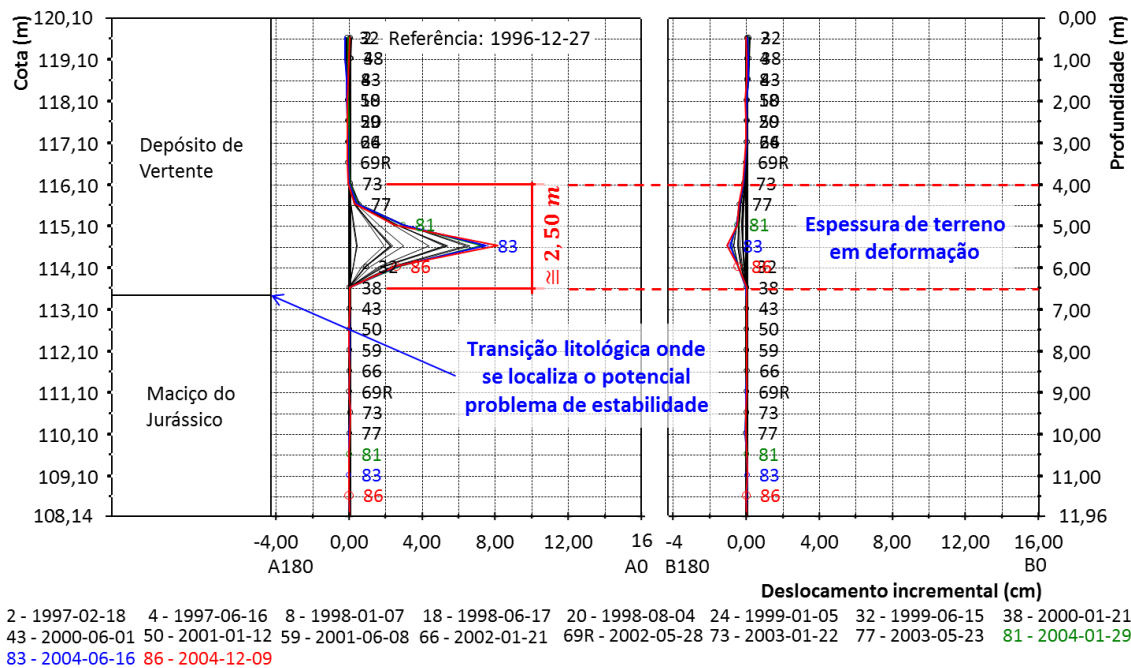


Figura 49 – Deslocamentos incrementais nas direções  $A$  e  $B$  (adaptado de Coimbra, 2016).

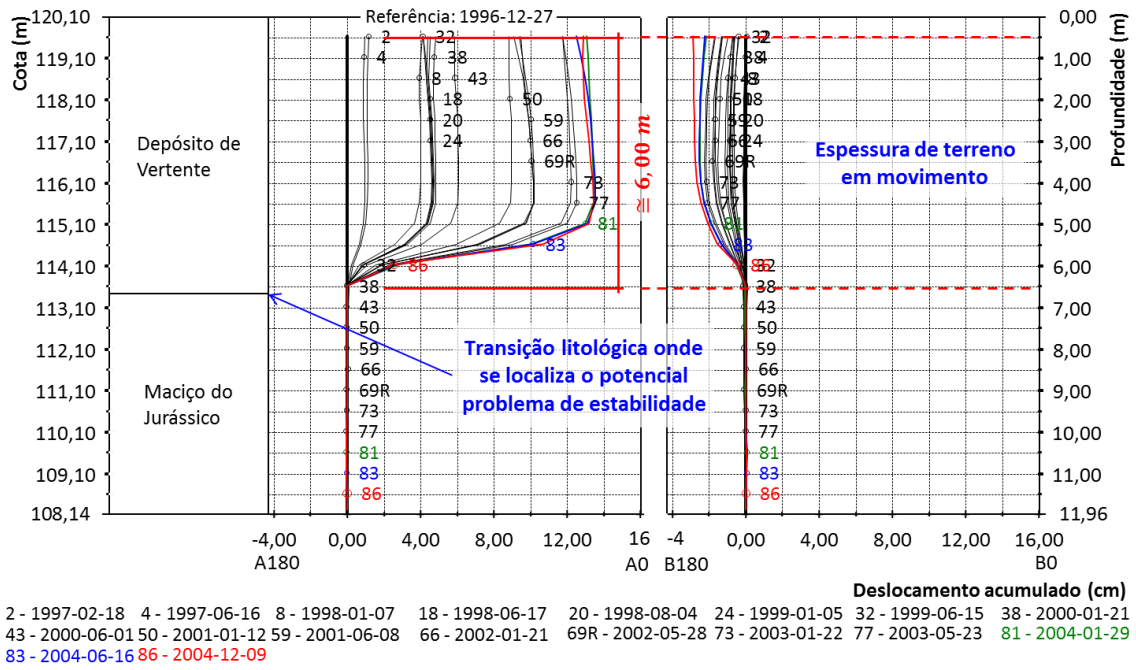


Figura 50 – Deslocamentos acumulados nas direções A e B (adaptado de Coimbra, 2016).

#### 5.4. Resultante dos deslocamentos e respetiva orientação

As equações (17) e (18) (5.3) exprimem o cálculo de deslocamentos nos planos A e B. No entanto, raramente os movimentos observados se direccionam exclusivamente no plano A. Por este motivo, a análise de resultados de uma campanha ordinária  $p$  baseia-se normalmente na resultante dos deslocamentos ocorridos nas direções A e B ( $\Delta_{p,i}^R$ ), e na respetiva orientação ( $\alpha_{p,i}$ ), de acordo com as equações (19) e (20), onde  $\Delta_{p,i}^R$ ,  $\Delta_{p,i}^A$  e  $\Delta_{p,i}^B$  representam valores de deslocamento incremental ( $\Delta d_{p,i}$ ) ou acumulado ( $\Delta D_{p,i}$ ), assim como  $\alpha_{p,i}$  se refere à orientação de  $\Delta d_{p,i}^R$  ou de  $\Delta D_{p,i}^R$ .

$$\Delta_{p,i}^R = \sqrt{(\Delta_{p,i}^A)^2 + (\Delta_{p,i}^B)^2} \quad (19)$$

$$\alpha_{p,i} = \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) \quad (20)$$

Note-se que a expressão (20) é indiferente ao quadrante em que a resultante dos deslocamentos se situa, sendo necessário proceder a correções condicionais:

$$\alpha_{p,i} = \begin{cases} 0; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B = 0 \\ \pi/2; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B > 0 \\ -\pi/2; \Delta_{p,i}^A = 0 \wedge \Delta_{p,i}^B < 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A); \Delta_{p,i}^A > 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) + \pi; \Delta_{p,i}^A < 0 \wedge \Delta_{p,i}^B \geq 0 \\ \tan^{-1}(\Delta_{p,i}^B / \Delta_{p,i}^A) - \pi; \Delta_{p,i}^A < 0 \wedge \Delta_{p,i}^B < 0 \end{cases} \quad (21)$$

A representação da orientação da resultante varia em função do programa de cálculo utilizado (in ex.: DELLC, 2018; RST, 2018; SISGEO, 2018, 2017b). Embora a tendência atual seja no sentido da

representação tridimensional de  $\Delta_{p,i}^R$ ,  $\alpha_{p,i}$  representa-se tradicionalmente num círculo trigonométrico, o que equivale à projeção da curva da resultante dos deslocamentos no plano transversal ao de referência do instrumento. Este tipo de representação é de leitura difícil, sobretudo em situações em que o deslocamento máximo não é superficial, na deteção de alterações de orientação em profundidade e na presença de um número apreciável de campanhas. A representação tridimensional de  $\Delta_{p,i}^R$  também não é de leitura fácil em suporte não digital e dificilmente apresenta uma visão global de  $\alpha_{p,i}$  em profundidade. O Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) utiliza um formato próprio para representar  $\alpha_{p,i}$  em profundidade, de forma a respeitar a convenção de sinais associados à identificação das calhas inclinométricas (Figura 45, 4) e a proporcionar boa legibilidade em profundidade para um número de campanhas apreciável, conforme desenvolvido por Salgado (1995). Na figura seguinte apresenta-se um exemplo da resultante dos deslocamentos acumulados ( $\Delta_{p,i}^R$ ) e da respetiva orientação ( $\alpha_{p,i}$ ).

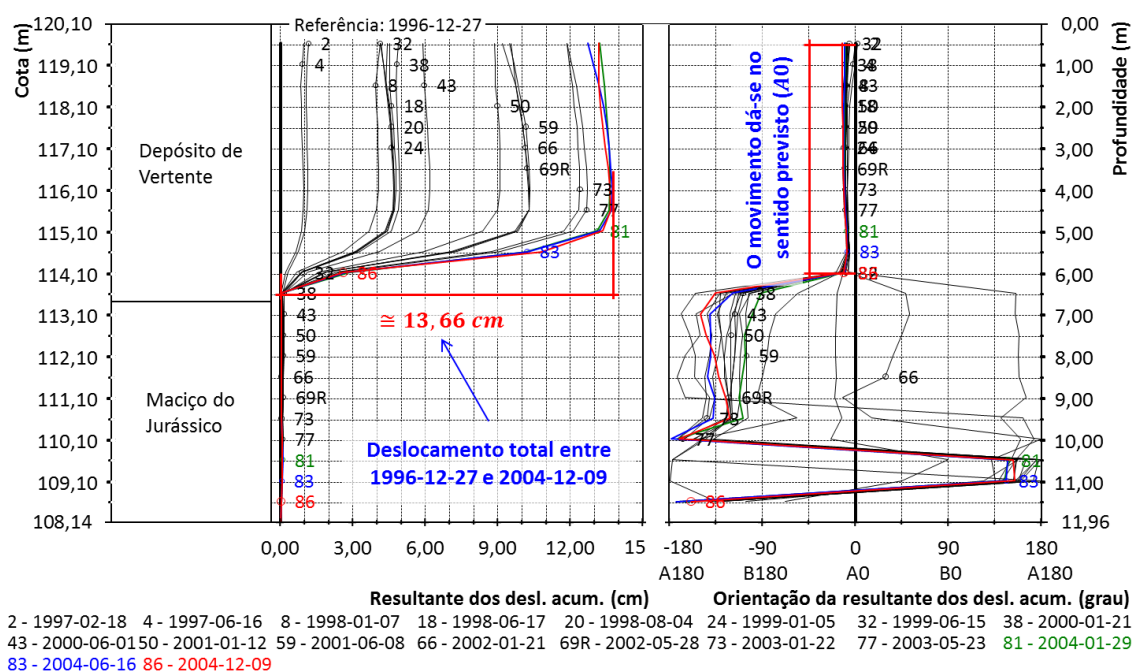


Figura 51 – Resultante dos deslocamentos acumulados e respetiva orientação (adaptado de Coimbra, 2016).

### 5.5. Evolução dos deslocamentos ao longo do tempo

A evolução dos deslocamentos ao longo do tempo é a principal ferramenta de análise dos resultados inclinométricos e permite acompanhar a progressão dos deslocamentos calculados em secções onde sejam mais expressivos. Esta ferramenta também facilita a correlação entre a verificação de alterações comportamentais (in ex.: a (des)aceleração dos movimentos) e a ocorrência de outros fatores, tais como diferentes fases de obra e alterações climáticas.

Partindo-se destes gráficos de evolução, é comum proceder-se à estimativa da velocidade e aceleração dos deslocamentos para efeitos de análise crítica (Salgado & Carvalho, 1998). Este procedimento pode fazer-se entre duas campanhas ou por regressão dos valores de deslocamento ao longo de um determinado período, considerando-se também o padrão comportamental.

Na Figura 52 retrata-se a evolução dos deslocamentos em três secções de um talude com uma superfície de deslizamento ativa na transição entre dois estratos com diferentes características de rigidez (Figura 49, Figura 50, 5.3; Figura 51; 5.4). Na Figura 53 apresenta-se a velocidade diária de progressão desses deslocamentos.

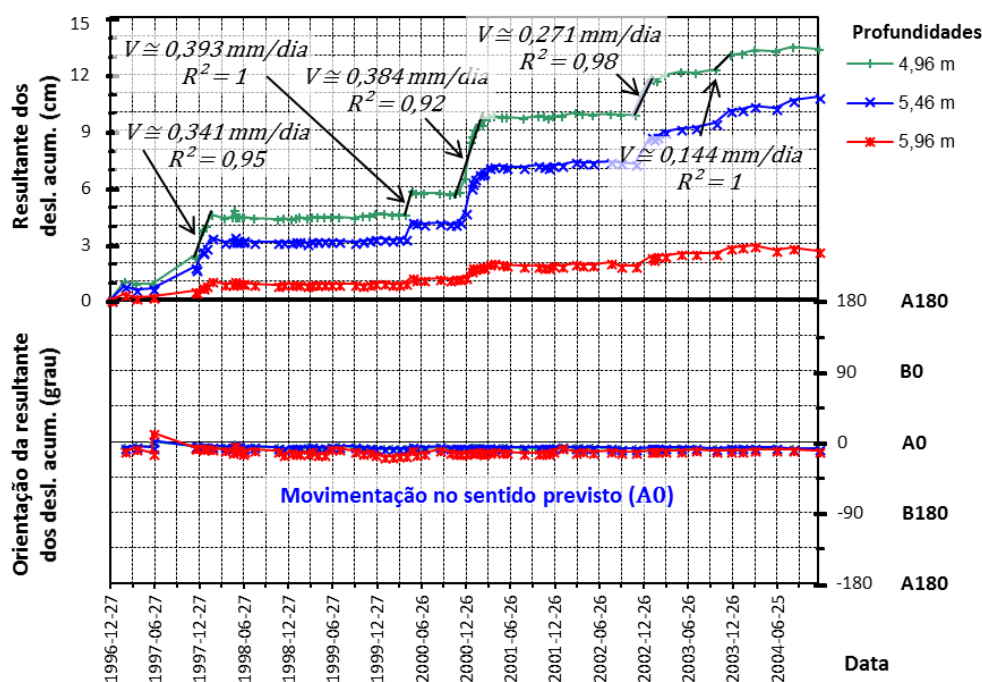


Figura 52 – Evolução da resultante dos deslocamentos e da respetiva orientação. Períodos de aceleração intermitentes com taxas de progressão variáveis (adaptado de Coimbra, 2016).

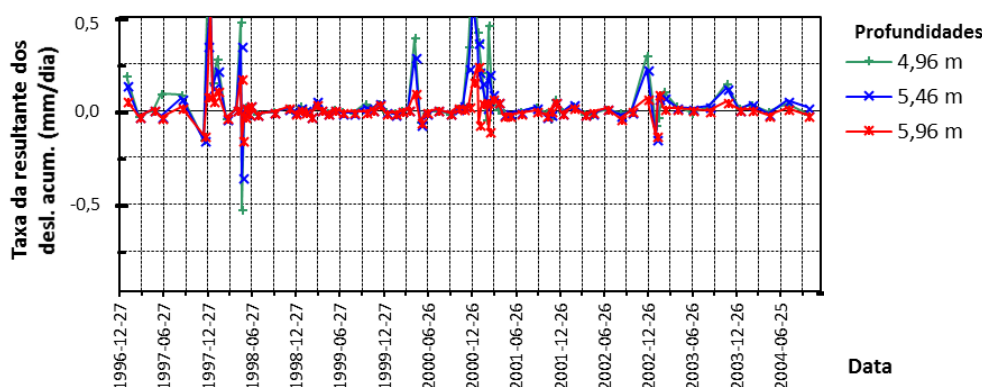


Figura 53 – Evolução da velocidade de progressão da resultante dos deslocamentos. Taxas de progressão diárias.

Na Figura 54 retrata-se a evolução dos deslocamentos de um talude instável, cuja taxa de progressão se agravou devido a intervenções realizadas na zona do pé. Neste caso as taxas de pro-

gressão são praticamente constantes e estimam-se considerando a totalidade das campanhas em duas fases distintas, antes e após a alteração do padrão comportamental.

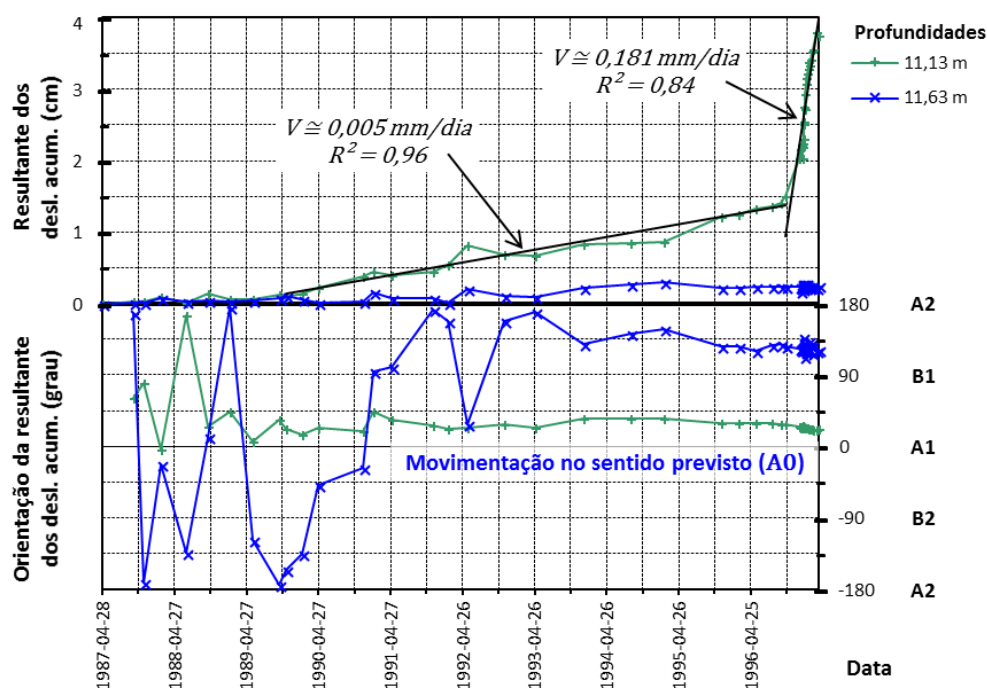


Figura 54 – Evolução da resultante dos deslocamentos e da respetiva orientação. Taxa de progressão constante com aceleração de movimento (adaptado de Coimbra, 2016).

## 5.6. Uso de múltiplas referências na mesma instalação inclinométrica

A utilização de várias referências interligadas é amplamente utilizada noutras áreas da metrologia<sup>1</sup>, mas não se conhecem aplicações no âmbito da observação inclinométrica. Este conceito foi introduzido no programa de cálculo InclinoReport (5.11; Coimbra, 2007).

O uso de múltiplas referências permite a manutenção de um histórico de referências de uma determinada instalação, tornando possível:

- a) o processamento de dados relativamente a uma determinada data;
- b) o processamento de dados provenientes de equipamentos inclinométricos distintos sem perda de continuidade dos resultados respetivos.

O ponto a) é útil quando há necessidade de proceder ao reinício do histórico de observação, devido, por exemplo, à ocorrência de intervenções no local ou à transição entre fases de obra distintas. Nestes casos o procedimento mais comum consiste na criação de um novo ficheiro de dados ou na alteração da campanha de referência. Contudo, a manutenção de um ficheiro único com várias campanhas de referência facilita a gestão de dados, permite a visualização geral do histórico de campanhas sem perda do registo de referência e oferece maior flexibilidade mediante a ne-

<sup>1</sup> Por exemplo, em topografia e no rastreamento de padrões de calibração.

cessidade de rever a progressão global dos deslocamentos.

O ponto *b)* constitui a principal razão pela qual este procedimento foi implementado no programa InclinoReport (5.11; Coimbra, 2007). Não é raro coexistirem dados provenientes de equipamentos distintos e referentes à mesma instalação inclinométrica, seja por avaria de equipamentos, por motivos de manutenção ou por haver mais de uma entidade responsável pela aquisição de dados. Note-se que “equipamentos distintos” não se refere necessariamente a modelos ou marcas diferentes de sistemas inclinométricos, mas engloba qualquer instrumento diferente do utilizado para constituição da campanha de referência de um determinado conjunto de campanhas ordinárias. Cada instrumento tem uma afinação específica e, embora possa não haver divergência significativa entre as medições obtidas por dois instrumentos numa secção isolada, o erro é ampliado por integração no processo de cálculo (6.4.3), transformando pequenas diferenças em erros notáveis (Dunnicliff, 1988; Mikkelsen, 2003).

Ainda relativamente ao processamento conjunto de dados provenientes de instrumentos distintos, é necessário atender às seguintes particularidades:

- os instrumentos devem incorporar o mesmo dispositivo de referência para controlo da profundidade (4.4);
- as sondas inclinométricas devem incorporar o mesmo ponto de referência<sup>1</sup> (Figura 57, 5.7);
- o passo de leitura deve ser o mesmo em ambos os instrumentos.

Caso não se verifiquem as condições acima descritas, pode adotar-se um dos seguintes procedimentos para contornar as discrepâncias entre profundidades de leitura:

- os dados são processados tendo em consideração as particularidades de cada instrumento, havendo a opção de normalização posterior de resultados por interpolação (6.4.4);
- a profundidade da medição de topo (5.7) é corrigida de forma a igualar as profundidades de leitura de ambos os instrumentos<sup>2</sup>.

Na Figura 55 ilustra-se a aplicação de múltiplas referências no processamento de dados inclinométricos. Sendo  $r$  e  $r + 1$  duas campanhas de referência datadas de tal forma que  $data_r < data_{r+1}$ , e sendo  $p$  e  $p + 1$  duas campanhas ordinárias datadas de tal forma que  $data_r < data_p < data_{r+1} < data_{p+1}$ , o deslocamento de  $p$  relativamente a  $r$  ( $\Delta_p^r$ ) e o deslocamento de  $p + 1$  relativamente a  $r + 1$  ( $\Delta_{p+1}^{r+1}$ ) correspondem ao resultado da equação (17) ou (18) (5.3), conforme se pretenda o cálculo de deslocamentos incrementais ou acumulados, respetivamente:

---

<sup>1</sup> Ou seja, a distância entre a primeira marca do cabo de medição e as rodas superiores da sonda inclinométrica deve ser a mesma em ambos os instrumentos.

<sup>2</sup> Por exemplo, através do uso de uma alonga com comprimento adequado (4.1). Note-se que este procedimento não contorna a existência de passos de leitura diferentes, mas é pouco provável que essa condição se verifique.



$$\begin{cases} \Delta d_{p,i}^r = d_{p,i} - d_{r,i} \\ \Delta D_{p,j}^r = D_{p,j} - D_{r,j} \end{cases} \wedge \begin{cases} \Delta d_{p+1,i}^{r+1} = d_{p+1,i} - d_{r+1,i} \\ \Delta D_{p+1,j}^{r+1} = D_{p+1,j} - D_{r+1,j} \end{cases} \quad (22)$$

Então, o deslocamento de  $p + 1$  relativamente a  $r$  ( $\Delta D_{p+1}^r$ ) corresponde a (Figura 55):

$$\begin{cases} \Delta d_{p+1,i}^r = \Delta d_{p,i}^r + \Delta d_{p+1,i}^{r+1} \\ \Delta D_{p+1,j}^r = \Delta D_{p,j}^r + \Delta D_{p+1,j}^{r+1} \end{cases} \quad (23)$$

desde que:

- o período de tempo decorrido entre as campanhas  $p$  e  $r + 1$  não seja significativo; caso contrário poderá haver deslocamento não contabilizado;
- o período de tempo decorrido entre as campanhas  $p$  e  $p + 1$  não divirja significativamente da frequência de observação estabelecida para a obra em causa; caso contrário poderá haver deslocamento não contabilizado.

Estas precauções espelham a importância das operações de manutenção indicadas nas secções 4.3, 4.5, 4.6 e 4.7, assim como os procedimentos de validação referidos em 6. Pois, se houverem procedimentos regulares de inspeção dos equipamentos e dos dados inclinométricos, rapidamente se deteta a necessidade de constituição de uma nova referência.

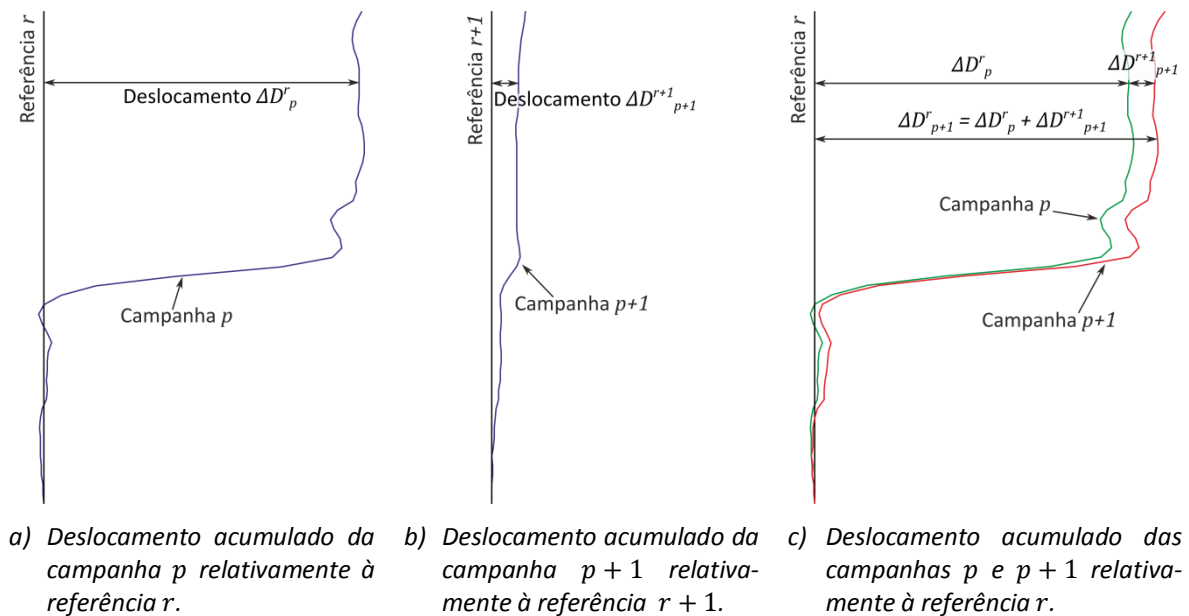


Figura 55 – Aplicação do conceito de multi-referência ao processamento de dados inclinométricos (adaptado de Coimbra, 2011).

Na Figura 56 comparam-se resultados provenientes de dois instrumentos distintos, processados com e sem a inclusão de múltiplas referências. A separação entre grupos de campanhas é bem visível nos deslocamentos da direção  $B$  e na orientação da resultante. Esta diferença deve-se a um erro de rotação (6.4.3) que não está corrigido. A segunda referência elimina o erro porque garante o cálculo de deslocamentos relativamente à referência do mesmo instrumento.

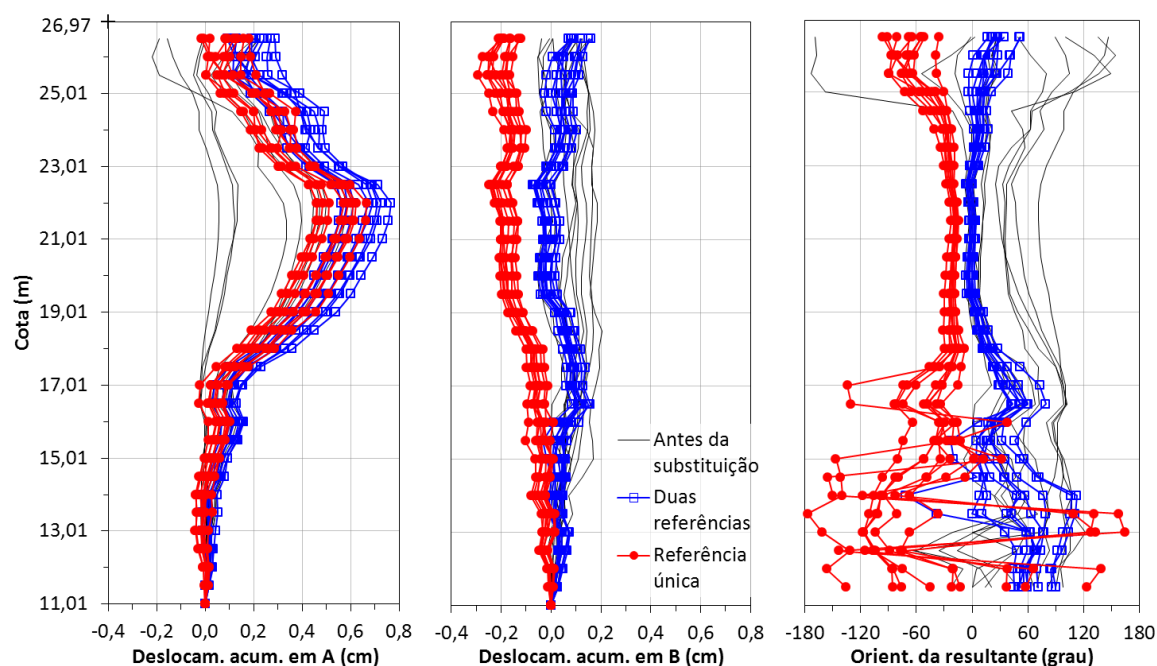


Figura 56 – Comparação de resultados provenientes de dois instrumentos distintos, processados com e sem a inclusão de múltiplas referências.

### 5.7. Profundidade da medição de topo, uso de alonga e diferença tubo-terreno

Um dos parâmetros a considerar no processamento de dados inclinométricos é a profundidade da medição de topo<sup>1</sup>. Este valor é normalmente entendido como a distância entre a marca do cabo de ligação correspondente à última leitura executada e o ponto de referência da sonda (Figura 57). O ponto de referência de uma sonda inclinométrica situa-se um passo de leitura abaixo da primeira marca do cabo de ligação (in ex.: 0,5 m; Figura 57). Em instrumentos clássicos este ponto coincide com o centro da sonda inclinométrica (in ex.: 2.2.4; DGSi, 2013c). Em instrumentos mais modernos este ponto de referência foi corrigido para as rodas superiores da sonda (in ex.: 2.2.5.4; DGSi, 2014b), uma vez que as medições inclinométricas são adquiridas em segmentos rígidos coincidentes com o espaçamento entre rodas. Esta particularidade deve ser considerada sempre que se procede à substituição de equipamentos, ou ao processamento conjunto de dados, cuja origem se reporta a mais de um sistema inclinométrico (5.6).

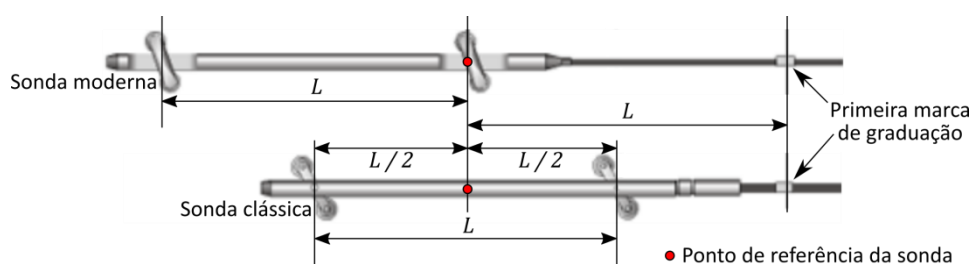


Figura 57 – Ponto de referência de sondas inclinométricas clássicas e modernas (adaptado de SINCO, 2018).

<sup>1</sup> Vulgarmente designada por profundidade da primeira leitura no Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

O controlo da profundidade por intermédio de roldana e mordentes (4.4) tem as seguintes implicações na profundidade de medição de topo:

- Quando se faz uso de alonga (4.1) deve corrigir-se a profundidade da medição de topo, de forma eliminar as leituras coincidentes com a mesma. Pois, a união incorporada na alonga introduz folga que se traduz frequentemente em deslocamentos acentuados no topo do tubo, podendo estes induzir erro na avaliação geotécnica de resultados.
- Por falta de extensão de cabo (Figura 57), a presença duma roldana inviabiliza a leitura da primeira marca em sistemas clássicos (Figura 40, 4.4). Portanto, independentemente da presença de uma alonga, a profundidade mínima da medição de topo em sistemas clássicos que operem com roldanas e mordentes é duas vezes o passo de leitura (in ex.: 1,0 m).

A prática generalizada consiste em definir a profundidade da medição de topo em função da marca do cabo coincidente com a última medição de campo. Esta prática introduz um ligeiro desfasamento entre as profundidades onde se verifica o desenvolvimento de deslocamentos e aquelas onde os mesmos ocorrem. Este desfasamento deve-se à diferença entre as cotas do topo do tubo e do terreno e à altura do dispositivo de referência para controlo da profundidade do tipo roldana e mordentes (4.4). O desfasamento referido é facilmente identificável em situações onde a ocorrência de deslocamentos coincida com a transição de estratos litológicos (in ex.: figuras 49 e 50, 5.3), mas o mesmo não se verifica noutras situações onde as causas da instabilidade sejam menos claras. Por esta razão, é vantajoso referir a profundidade da medição de topo à cota do terreno, até porque a análise da estabilidade geotécnica é consequente da localização duma superfície de rotura (in ex.: 5.8.2).

Há programas informáticos que incluem um parâmetro adicional para correção do desfasamento acima referido (in ex.: DGSI, 2014c). O InclinoReport (5.11; Coimbra, 2007) produz resultados enquadrados com a cota do terreno através de um parâmetro que corresponde à diferença de cotas entre o topo do tubo e a superfície do terreno (Figura 58). Este parâmetro é denominado diferença tubo-terreno ( $\Delta_t$ ) e define-se de acordo com a expressão (24), podendo obter-se por medição direta ou através do levantamento de cotas. O programa inquer<sup>1</sup> a marca da última medição ( $n$ ), a dimensão da alonga utilizada ( $l$ ) e a existência de roldana e mordentes ( $m$ ), tratando a última como constante<sup>2</sup>. Conhecidas estas variáveis, a profundidade da medição de topo ( $P_t$ ) determina-se através da equação (25), onde  $L$  é o passo de leitura. A profundidade corrigida para produção de resultados ( $P_t^{corr}$ ) relativamente à cota do terreno corresponde ao valor da equação (26).

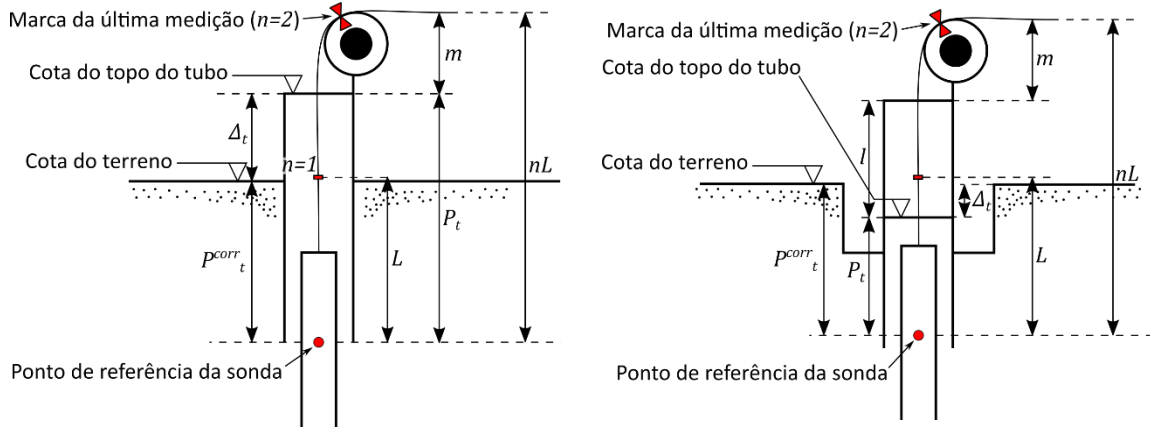
<sup>1</sup> O InclinoReport (5.11; Coimbra, 2007) também permite a introdução manual de uma distância personalizada entre o topo do tubo e o ponto de referência da sonda inclinométrica.

<sup>2</sup> Em dispositivos de referência para controlo da profundidade da Slope Indicator Company (SINCO), assim como na maioria dos fabricantes de inclinómetros, a distância adicional que deriva do uso de roldana e mordentes é cerca de 30 cm, podendo este valor variar ligeiramente em função do diâmetro da roldana.

$$\Delta_t = \text{Cota do topo do tubo} - \text{Cota do terreno} \quad (24)$$

$$P_t = nL - l - m \quad (25)$$

$$P_t^{corr} = P_t - \Delta_t \quad (26)$$



a) Cota do tubo superior à cota do terreno.

b) Cota do tubo inferior à cota do terreno.

Figura 58 – Diferença tubo-terreno e profundidade da medição de topo (adaptado de Coimbra, 2007).

Observando-se a Figura 58 e a equação (25), compreende-se que o InlinoReport (5.11; Coimbra, 2007) define a profundidade da medição de topo relativamente ao topo do tubo inclinométrico com exclusão da alonga e do dispositivo de referência para controlo da profundidade. Comparativamente à prática globalmente estabelecida, esta metodologia facilita a correção daquela profundidade para fins de enquadramento litológico e permite aos operadores definirem a marca coincidente com a última medição de uma forma mais clara, assegurando-se sempre a condição  $P_t^{corr} \geq 0$  (in ex.: última leitura executada abaixo do terreno).

## 5.8. Cálculo de distorções a partir de resultados inclinométricos

### 5.8.1. Estimativa das distorções ocorridas no terreno

A estimativa de distorções em solos a partir de resultados inclinométricos foi desenvolvida no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) por Salgado (1995). O método estabelece uma analogia entre um ensaio laboratorial de corte simples e o deslocamento inclinométrico obtido em cada secção de tubo (Figura 59), desde que a orientação dos movimentos se mantenha constante em profundidade (Figura 51; Salgado, 1995; Salgado & Carvalho, 1998).

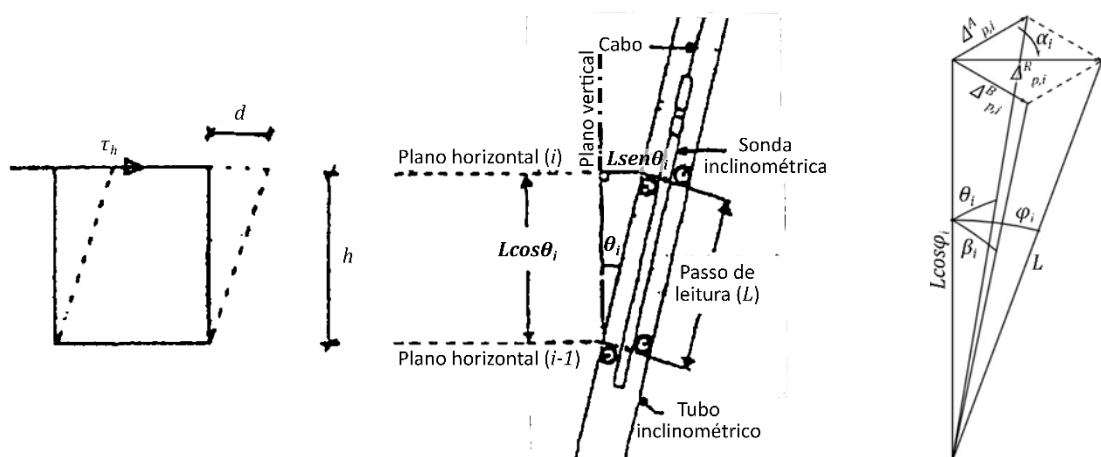
A expressão (27) corresponde ao cálculo da distorção horizontal ( $\gamma_h$ ) ocorrida num ensaio de corte simples, traduzindo-se pela razão entre o deslocamento medido no topo da amostra ( $d$ ) e a espessura da mesma ( $h$ ). Aplicando a mesma formulação em valores da resultante dos deslocamentos inclinométricos de uma campanha ordinária  $p$  ((19), 5.4), obtém-se a expressão (28), onde  $\varphi_{p,i}$ , calculado através da equação (29), é o ângulo entre o plano de referência do instrumento e

o vetor coincidente com a secção de tubo  $i$  (Figura 59c).

$$\gamma_h = d/h \quad (27)$$

$$\gamma_{p,i}^h [\%] = 100 \frac{\Delta_{p,i}^R - \Delta_{p,i-1}^R}{L \cos \varphi_{p,i}} \quad (28)$$

$$\varphi_{p,i} = \sin^{-1} \frac{\Delta_{p,i}^R - \Delta_{p,i-1}^R}{L} \quad (29)$$



a) *Distorção de provete de solo em ensaio de corte simples.* b) *Distorção de secção de solo observada por meios inclinométricos.* c) *Esquema 3D da resultante dos deslocamentos.*

Figura 59 – Conceito associado à estimativa de distorções em solos a partir de resultados inclinométricos (adaptado de Salgado & Carvalho, 1999).

Na figura seguinte apresenta-se o perfil das resultantes dos deslocamentos da Figura 51 (5.4), juntamente com o perfil das respetivas distorções em profundidade.

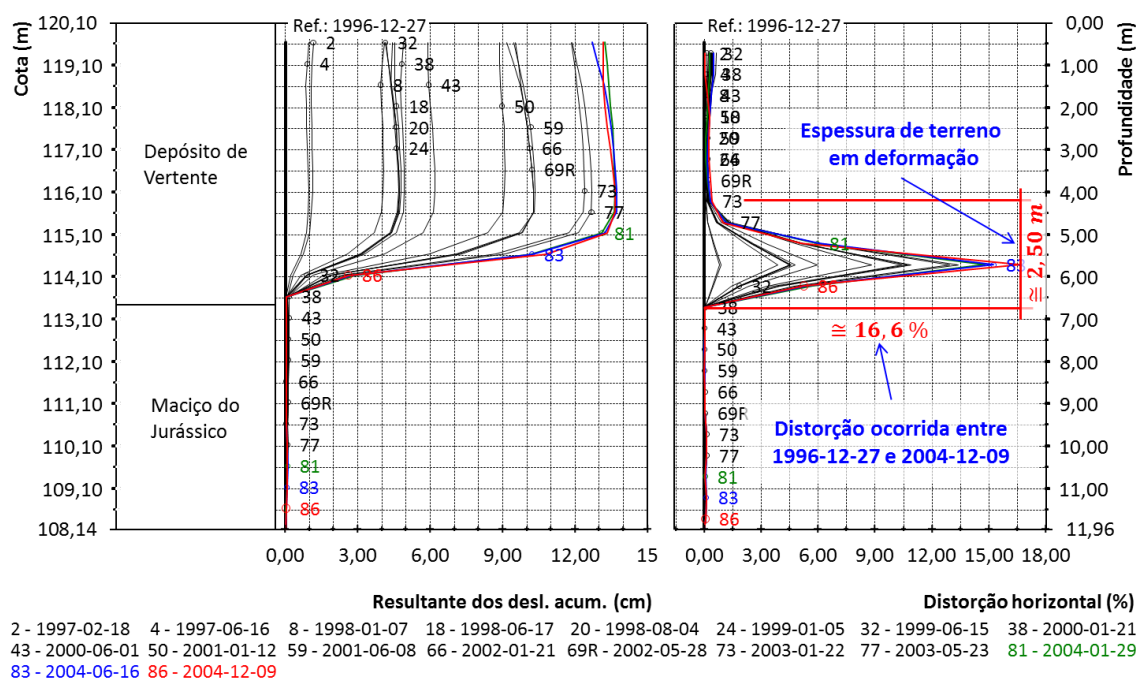


Figura 60 – Resultante dos deslocamentos acumulados e respetiva distorção no solo.

Tal como referido na secção 5.5 (Figura 52) relativamente aos valores de deslocamento, o acompanhamento da evolução das distorções ao longo do tempo também constitui uma ferramenta de análise de grande utilidade; pois permite basear a avaliação da evolução da estabilidade em parâmetros geotécnicos (5.8.2).

### 5.8.2. Estimativa de um fator de segurança local a partir das distorções estimadas e dos parâmetros geotécnicos dos solos respetivos

Partindo-se dos valores de  $\gamma_{p,i}^h$  ((28), 5.8.1), Salgado (1995) sugere a estimativa de um fator de segurança local ( $FSL$ ) com base na curva tensão/deformação de ensaios laboratoriais (Figura 61):

$$FSL = \tau_{p,i} / C_u(pico) \quad (30)$$

sendo  $\tau_{p,i}$  a tensão de corte correspondente a  $\gamma_{p,i}^h$ , na secção  $i$  à data da campanha  $p$ , e  $C_u(pico)$  a tensão máxima de resistência ao corte não drenada.

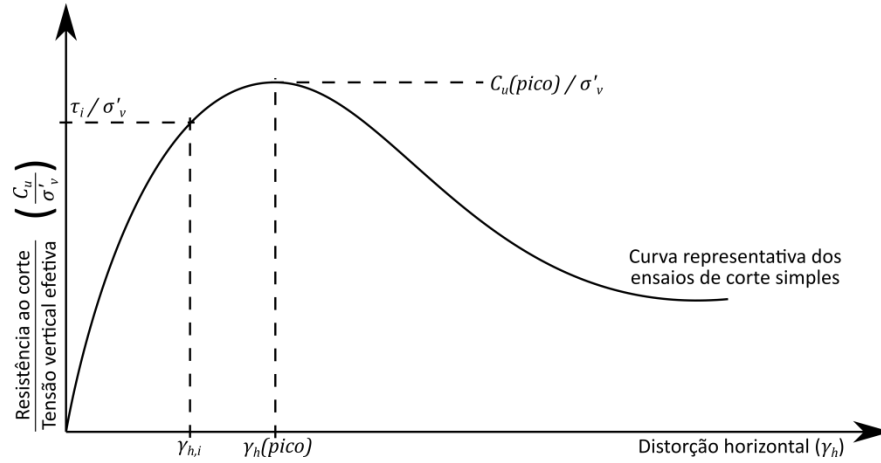


Figura 61 – Esquema representativo de uma curva tensão/deformação obtida a partir de ensaios laboratoriais de corte simples (adaptado de Salgado, 1995).

Carvalho (1997) expande este conceito para condições de tensão de confinamento *in situ* por recurso ao modelo hiperbólico de Duncan & Chang (1970), conforme adaptado por Salgado (1990) de tensões deviatóricas para tensões de corte:

$$\tau = \frac{\gamma}{1/G_i + \gamma R_f / \tau_{rot}} \quad (31)$$

onde  $\tau = (\sigma_1 - \sigma_3)/2$  é a tensão de corte do solo, sendo  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$  as tensões principais,  $\gamma$  a distorção total,  $G_i$  o módulo de corte inicial<sup>1</sup> e  $R_f = \tau_{rot} / \tau_{ult}$  o coeficiente de rotura<sup>1</sup>, onde  $\tau_{rot}$  e  $\tau_{ult}$  são as tensões de rotura e última, respetivamente.

A equação (32) exprime a porção de tensão mobilizada relativamente à capacidade de resistência

<sup>1</sup>  $G_i$ ,  $\tau_{rot}$  e  $R_f$  podem estimar-se através de ensaios laboratoriais ou de campo (Carvalho, 1997; Clayton et al., 1995; Duncan & Chang, 1970; Hunt, 2007; Salgado, 1990). Duncan et al. (1980) e Byrne et al. (1987) apresentam parâmetros característicos para uma grande variedade de solos. Estes valores podem utilizar-se em avaliações preliminares de  $FSL$  ((33), (34); Salgado & Carvalho, 1998).

do solo, designada por nível de tensão (*stress level*,  $S$ ; Duncan & Chang, 1970). Neste contexto,  $FSL$  corresponde ao inverso de  $S$ , de acordo com a equação (33) (Carvalho, 1997), e a distorção correspondente a  $\tau_{rot}$  ( $\gamma_{rot}$ ) pode obter-se para  $FSL = 1$ , conforme a expressão (34) (Salgado & Carvalho, 1998).

$$S = \frac{\tau}{\tau_{rot}} = \frac{\gamma G_i}{\tau_{rot} + G_i \gamma R_f} \quad (32)$$

$$FSL = S^{-1} = \frac{\tau_{rot} + G_i \gamma R_f}{\gamma G_i} \quad (33)$$

$$FSL = 1 = \frac{\tau_{rot} + G_i \gamma_{rot} R_f}{\gamma_{rot} G_i} \Leftrightarrow \gamma_{rot} = \frac{\tau_{rot}}{G_i(1-R_f)} \quad (34)$$

Este procedimento é válido para deslocamentos que têm a mesma orientação em duas secções contíguas (in ex.:  $i-1$  e  $i$ ), desde que a superfície de deslizamento seja normal à instalação inclinométrica (in ex.:  $\gamma_h \cong \gamma$ ). Salgado & Carvalho (1998) propõem a seguinte metodologia para inferir  $\gamma_{p,i}$  a partir de  $\gamma_{p,i}^h$  em situações de corte distintas (Figura 62):

1. localização da superfície de deslizamento em cada instalação inclinométrica;
2. execução de uma série de análises de modelação analítica de tal forma que a superfície de deslizamento resultante do modelo coincida com as localizações obtidas no ponto 1;
3. registo do ângulo  $\omega_i$  entre a tangente à superfície de deslizamento modelada e o plano coincidente com  $\gamma_{p,i}^h$  em cada localização definida no ponto 1;
4. estimativa de  $\gamma_{p,i}$  em função de  $\gamma_{p,i}^h$  e de  $\cos \omega_i$ , conforme a equação (35).

$$\gamma_{p,i} = \gamma_{p,i}^h / \cos \omega_i \quad (35)$$

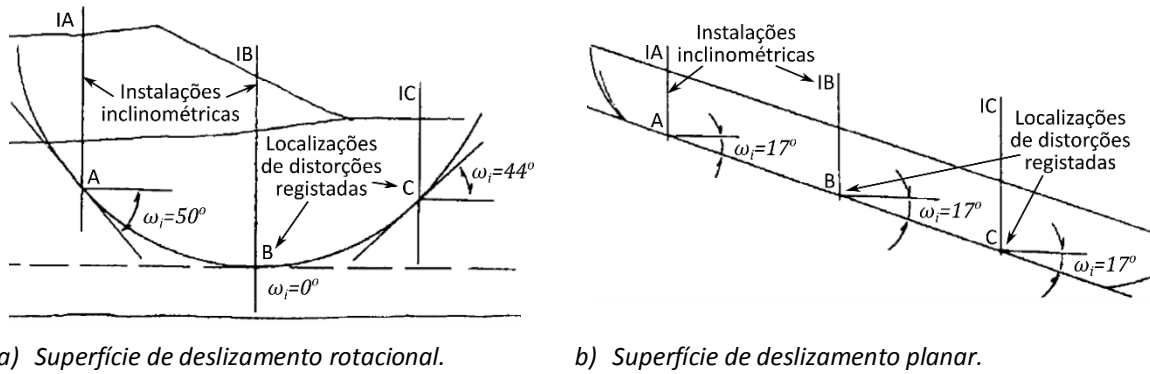


Figura 62 – Estimativa da distorção total ( $\gamma$ ) em função da distorção horizontal ( $\gamma_h$ ) e da geometria da superfície de deslizamento provável (adaptado de Salgado & Carvalho, 1999).

Com base no trabalho de Samarasekera (1982)<sup>1</sup>, Salgado et al. (2010) introduzem uma correção

<sup>1</sup> Samarasekera (1982) apresenta uma adaptação do modelo hiperbólico a situações de anisotropia, onde refere que a existência de uma tensão anisotrópica inicial afeta a resistência e a rigidez da curva tensão/deformação de uma amostra ensaiada em condições não drenadas. O mesmo modelo pode aplicar-se para descrever a deformação de uma amostra em função do sistema de tensões em que se encontra (in ex.: dependendo da rotação do referencial das tensões principais).

adicional no sentido de considerarem o efeito duma tensão de corte inicial<sup>1</sup> ( $\tau_i$ ) no valor de distorção correspondente a  $\tau_{rot}$  ( $\gamma_{rot}$ ).

Para  $\tau \geq \tau_i$  a equação (31) pode reescrever-se da seguinte forma (Smarasekera, 1982):

$$(\tau - \tau_i) = \frac{\gamma}{1/G_i + \gamma R_f / (\tau_{rot} - \tau_i)}; R_f = \frac{\tau_{rot} - \tau_i}{\tau_{ult} - \tau_i} \quad (36)$$

Seguindo o mesmo procedimento aplicado na obtenção de  $\gamma_{rot}$  ((34)), para  $FSL = 1$  tem-se  $\tau = \tau_{rot}$  e  $\gamma = \gamma_{rot}$ , pelo que (Salgado et al., 2010):

$$\gamma_{rot} = \frac{(\tau_{rot} - \tau_i)}{G_i(1 - R_f)} \quad (37)$$

### 5.8.3. Aplicação dos valores de distorção para efeitos de estimativa do tempo de vida útil das instalações inclinométricas

#### 5.8.3.1. Estimativa da distorção do tubo e do valor máximo respetivo

A capacidade de estimar e acompanhar as distorções ocorridas no solo (5.8.1) constitui um avanço das ferramentas de análise de resultados inclinométricos, uma vez que se torna possível estimar um fator de segurança local (5.8.2) e assim obter uma avaliação mais objetiva do ponto de vista da estabilidade. Contudo, a utilização daquelas metodologias, especificamente a estimativa de um fator de segurança local, exige o conhecimento de parâmetros geotécnicos locais ((34), (37), 5.8.2). Portanto, é importante que a instalação de tubos inclinométricos seja acompanhada da recolha de amostras, ou de ensaios de campo, sempre que se justifique e que seja possível. Neste sentido convém prever o tempo de vida útil das instalações inclinométricas, com base na máxima deformação mensurável e nas taxas de evolução dos deslocamentos, já que a sua substituição<sup>2</sup> torna oportuna a recolha de amostras nas zonas de maior distorção e só o planeamento atempado destas tarefas garante a continuidade das observações.

Carvalho (1997) estima a máxima distorção horizontal passível de registo com base no deslocamento máximo mensurável, função dos diâmetros do tubo e da sonda, e com base no comprimento da sonda inclinométrica. Carvalho (1997) refere também que a máxima distorção horizontal depende adicionalmente da geometria inicial do tubo inclinométrico, da evolução dos deslocamentos ao longo do tempo e da distribuição das deformações ao longo do tubo, podendo estas ter carácter mais ou menos localizado.

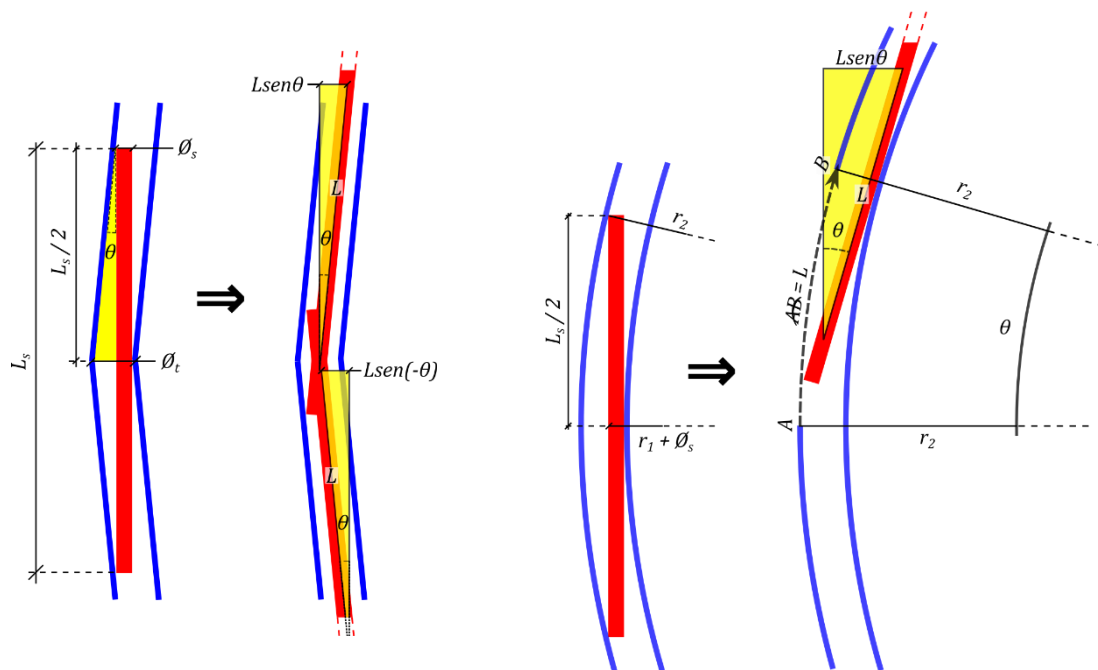
Carvalho et al. (2016) apresentam uma nova metodologia para estimativa do tempo de vida útil de instalações inclinométricas, com base na distorção dos respetivos tubos, podendo esta calcu-

<sup>1</sup> Por exemplo, em superfícies de deslizamento planares com plano inclinado.

<sup>2</sup> Por exemplo, devido a deformação excessiva.



lar-se a partir dos desvios incrementais (5.2) de qualquer campanha. A mesma publicação apresenta uma nova abordagem relativamente à deformação máxima acomodável pelo tubo, em função da distribuição das deformações, tal como se apresenta na Figura 63.



a) Deformação completamente localizada.

b) Deformação perfeitamente distribuída.

Figura 63 – Deformação máxima acomodável por um tubo inclinométrico sem que a circulação de uma sonda seja comprometida (adaptado de Carvalho et al., 2016).

No caso de uma deformação limite localizada (Figura 63a), o ângulo de inclinação correspondente ( $\theta_{loc}$ ) pode obter-se através da expressão (38), onde  $\phi_t$  é o diâmetro interno do tubo (Figura 18, 3.2.3),  $\phi_s$  é o diâmetro externo da sonda<sup>1</sup> e  $L_s$  é o comprimento da sonda inclinométrica<sup>2</sup>. No entanto, a Figura 63a demonstra claramente que, neste caso, o máximo ângulo mensurável também depende da posição da sonda relativamente ao ponto de inflexão da deformação do tubo. Pois, a inclinação medida só corresponde à real quando as leituras se obtêm antes e depois daquele ponto, havendo mesmo a possibilidade de se medir o dobro do diferencial de inclinações quando a sonda se encontra centrada relativamente ao mesmo (Quadro 15).

$$\theta_{loc} = \tan^{-1} \frac{\phi_t - \phi_s}{L_s/2} \quad (38)$$

Quando a deformação limite é perfeitamente distribuída (Figura 63b) considera-se que a curvatura do tubo é aproximadamente constante, pelo que interessa determinar o raio de curvatura mínimo que permita a circulação da sonda. Este raio pode calcular-se com recurso à expressão (39),

<sup>1</sup> O diâmetro externo das sondas portáteis verticais é normalmente 25 – 30 mm. Sondas horizontais e oblíquas têm diâmetros superiores (in ex.: 44-45 mm; GEOKON, 2014c; SOIL, 2014b).

<sup>2</sup> O comprimento total de sondas inclinométricas portáteis é normalmente 700 – 750 mm.

onde  $r_1$  e  $r_2$  são os raios mínimos correspondentes às faces côncava e convexa do tubo, respetivamente. Assim, o ângulo de inclinação máximo numa situação de deformação perfeitamente distribuída ( $\theta_{dis}$ ) pode obter-se em função da equação (40), sendo  $L$  o passo de leitura do sistema e dando-se preferência a  $r_2$  em detrimento de  $r_1$ , já que o primeiro resulta em menor valor de  $\theta_{dis}$ .

$$\begin{cases} r_2^2 = (r_1 + \phi_s)^2 + (L_s/2)^2 \\ r_2 = r_1 + \phi_t \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} r_1 = \frac{(L_s/2)^2 + \phi_s^2 - \phi_t^2}{2(\phi_t - \phi_s)} \\ r_2 = r_1 + \phi_t \end{cases} \quad (39)$$

$$\theta_{dis} = L/r_2 \quad (40)$$

Conhecido o valor do ângulo de inclinação máximo, o desvio incremental correspondente obtém-se pela expressão (15) (5.2), ao qual corresponde o valor máximo de distorção do tubo:

$$\gamma_{tm}[\%] = 100 \frac{d_i - d_{i-1}}{L \cos \theta}; \theta = \theta_{loc} \vee \theta = \theta_{dis} \quad (41)$$

onde  $d_i$  e  $d_{i-1}$  são os desvios incrementais em duas secções contíguas.

Considerando uma sonda do sistema clássico da Slope Indicator Company (DGSI, 2013c), com  $L_s = 745 \text{ mm}$ ,  $\phi_s = 25,4 \text{ mm}$  e  $L = 500 \text{ mm}$ , os valores máximos do ângulo de inclinação entre dois troços contíguas, dos desvios incrementais e da distorção correspondentes, para os diâmetros de tubo mais utilizados (Figura 18, 3.2.3), encontram-se nos quadros 15 e 16, conforme as deformações sejam do tipo localizada ou perfeitamente distribuído, respetivamente.

Quadro 15 – Condição de deformação localizada. Estimativa da distorção máxima para os diâmetros de tubo mais utilizados (adaptado de Carvalho et al., 2016).

Tubo (Figura 18, 2.1.2)	Âng. máx.	Desvio incremental máximo			Distorção máxima	
	$(\theta_{loc}, \text{grau})$	$(d_{i-1}, \text{mm})^i$	$(d_{i-1}, \text{mm})^{ii}$	$(d_i, \text{mm})$	$(\gamma_{tm}, \%)^i$	$(\gamma_{tm}, \%)^{ii}$
<b>Estreito</b>	3,60	0,00	-31,41	31,41	6,30	12,59
<b>Médio</b>	4,81	0,00	-41,93	41,93	8,42	16,83
<b>Largo</b>	7,73	0,00	-67,24	67,24	13,57	27,14

<sup>i</sup>Máxima distorção localizada com medições recolhidas a meio do ponto de maior distorção.

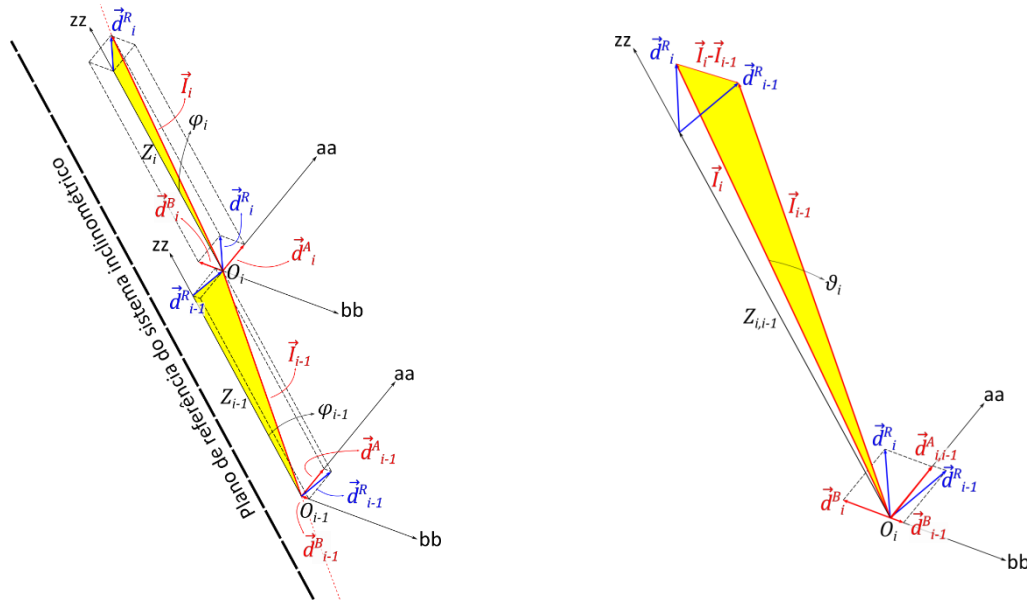
<sup>ii</sup>Máxima distorção localizada com medições recolhidas abaixo e acima do ponto de maior distorção.

Quadro 16 – Condição de deformação perfeitamente distribuída. Estimativa da distorção máxima para os diâmetros de tubo mais utilizados (adaptado de Carvalho et al., 2016).

Tubo (Figura 18, 2.1.2)	Raios de curvatura		Âng. máx.	Desvio incremental máximo		Dist. máx.
	$[r_1, \text{mm}]$	$[r_2, \text{mm}]$	$[\theta_{dis}, \text{grau}]$	$[d_{i-1}, \text{mm}]$	$[d_i, \text{mm}]$	$[\gamma_{tm}, \%]$
<b>Estreito</b>	2921,43	2970,28	9,64	0,00	83,77	16,99
<b>Médio</b>	2171,94	2228,69	12,85	0,00	111,23	22,82
<b>Largo</b>	1321,79	1397,74	20,50	0,00	175,07	37,38

Dos quadros 15 e 16 conclui-se que, dependendo da distribuição das deformações ao longo do tubo e da posição da sonda relativamente às mesmas, a gama de distorções limite é bastante abrangente, podendo variar entre 6,30 – 16,99 %, 8,42 – 22,82 % ou 13,57 – 37,38 % para tubos do tipo estreito, médio ou largo, respetivamente. Assim, Carvalho et al. (2016) recomendam os limites mínimos do Quadro 15 para efeitos de previsão da vida útil das instalações, uma vez que é difícil conhecer exatamente o perfil de deformação do tubo e é impossível deduzir a posição da sonda relativamente aos pontos de inflexão das deformações localizadas.

De forma semelhante à estimativa de distorções do terreno por intermédio da resultante dos deslocamentos ((28), (29), 5.8.1), a distorção do tubo entre cada par de secções contíguas pode estimar-se através dos desvios incrementais de qualquer campanha (Figura 64).



a) Vista tridimensional de duas secções de tubo contíguas e dos desvios incrementais respetivos. b) Vista tridimensional do ângulo de rotação do tubo entre duas secções contíguas.

Figura 64 – Conceito associado ao cálculo da distorção de tubos inclinométricos (adaptado de Carvalho et al., 2016).

Na Figura 64a representam-se duas secções de tubo contíguas,  $\vec{I}_{i-1}$  e  $\vec{I}_i$ , juntamente com os vetores correspondentes aos desvios incrementais nas direções A e B,  $\vec{d}^A$  e  $\vec{d}^B$ , respetivamente, e com os vetores de desvio resultante  $\vec{d}_{i-1}^R$  e  $\vec{d}_i^R$ . Cada secção  $\vec{I}$  pode definir-se como:

$$\vec{I} = A\hat{a} + B\hat{b} + Z\hat{z}; \|\vec{I}\| = L \quad (42)$$

sendo  $L$  o passo de leitura e:

$$\begin{cases} A = \|\vec{d}^A\| \\ B = \|\vec{d}^B\| \\ Z = \sqrt{L^2 - A^2 - B^2} \end{cases} \quad (43)$$

Na Figura 64b observam-se as mesmas secções de tubo representadas no ponto  $O_i$ , correspondente à intersecção entre  $\vec{I}_{i-1}$  e  $\vec{I}_i$ . O ângulo  $\vartheta_i$  obtém-se através do produto escalar daqueles vetores ((44)) e a distorção do tubo ( $\gamma_i^t$ ) exprime-se pela tangente deste ângulo ((45)).

$$\vec{I}_i \cdot \vec{I}_{i-1} = \|\vec{I}_i\| \|\vec{I}_{i-1}\| \cos \vartheta_i \Leftrightarrow \vartheta_i = \cos^{-1} \frac{\vec{I}_i \cdot \vec{I}_{i-1}}{\|\vec{I}_i\| \|\vec{I}_{i-1}\|} \quad (44)$$

$$\gamma_i^t [\%] = 100 \tan \vartheta_i \quad (45)$$

Na Figura 65 apresenta-se a geometria de um tubo inclinométrico juntamente com a respetiva distorção. Note-se que os picos de distorção dependem apenas de variações de inclinação e são independentes dos valores de desvio.

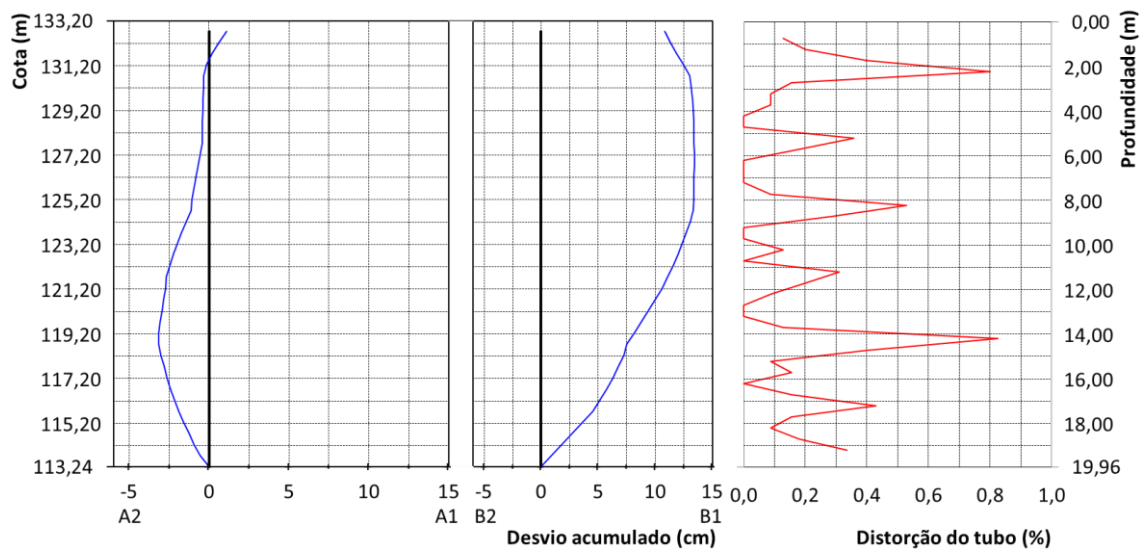


Figura 65 – Geometria e distorção de um tubo inclinométrico (adaptado de Carvalho et al., 2016).

Na Figura 66 apresenta-se a comparação entre a distorção horizontal ocorrida no solo ( $\gamma_{p,i}^h$ , (28), (29), 5.8.1) e a distorção do tubo ( $\gamma_i^t$ , (44), (45)) para a mesma instalação constante nas figuras 49 e 50 (5.3), 51 (5.4), 52 e 53 (5.5), e 60 (5.8.1). Note-se que  $\gamma_{p,i}^h$  apresenta valores superiores a  $\gamma_i^t$ , verificando-se também menor número de picos de distorção em  $\gamma_{p,i}^h$  relativamente a  $\gamma_i^t$ . Estas diferenças devem-se ao facto de  $\gamma_i^t$  considerar o diferencial de rotação entre duas secções contíguas, enquanto  $\gamma_{p,i}^h$  considera apenas os deslocamentos ocorridos numa secção.

Carvalho et al. (2016) procedem a um estudo comparativo da estimativa da vida útil de tubos inclinométricos com base nos valores de distorção horizontal ( $\gamma_{p,i}^h$ ) e de distorção do tubo ( $\gamma_i^t$ ). O estudo abrange um conjunto de tubos interrompidos por deformação excessiva: dois largos, um médio e outro estreito, caracterizando-se os três primeiros por uma progressão sazonal dos deslocamentos (in ex.: figuras 52 e 53, 5.5) e o último por um comportamento linear cuja progressão dos deslocamentos se agravou devido a intervenções no pé daquele talude (in ex.: Figura 54, 5.5).

O processo de previsão contempla o cálculo incremental de taxas de progressão ao longo do tempo de vida de cada instalação, no sentido de comparar as previsões de vida útil iguais ou inferiores a 60 dias (in ex.: anteceder a data em que  $\gamma_{tm}$  se atinge). Os autores concluem:

- o desfasamento entre  $\gamma_{p,i}^h$  e  $\gamma_i^t$  é tão maior quanto maior for o diâmetro do tubo inclinométrico. Pois,  $\gamma_{p,i}^h$  baseia-se apenas nos deslocamentos de cada secção relativamente ao perfil de referência e não contempla o diferencial de deformação do tubo entre duas secções contíguas. Logo, quanto maior for a magnitude dos deslocamentos maior será o desfasamento entre  $\gamma_{p,i}^h$  e  $\gamma_i^t$ ;
- de um modo geral, tanto  $\gamma_{p,i}^h$  como  $\gamma_i^t$  se encontram dentro dos intervalos previstos aquando da interrupção dos tubos inclinométricos (Quadro 15);
- $\gamma_{p,i}^h$  situa-se na margem superior do intervalo de valores limite do Quadro 15, enquanto  $\gamma_i^t$  se situa na margem inferior. Consequentemente,  $\gamma_{p,i}^h$  tende a produzir previsões por excesso e  $\gamma_i^t$  tende a produzir previsões por defeito;
- há maior risco de interrupção precoce quando a previsão se baseia em valores de  $\gamma_i^t$ , mas as previsões baseadas nesta variável são mais próximas da data de interrupção dos tubos. Ou seja,  $\gamma_{p,i}^h$  prevê o final da vida útil muito precocemente, sendo o desfasamento entre as datas prevista e verificada tanto maior quanto maior for o diâmetro do tubo inclinométrico;
- apesar de  $\gamma_{p,i}^h$  produzir previsões precoces, as progressões das respetivas distorções são mais previsíveis (in ex.: há menor erro entre as datas prevista e verificada para a ocorrência de  $\gamma_{p,i}^h = \gamma_{tm}$  relativamente ao erro homólogo para a ocorrência de  $\gamma_i^t = \gamma_{tm}$ ).

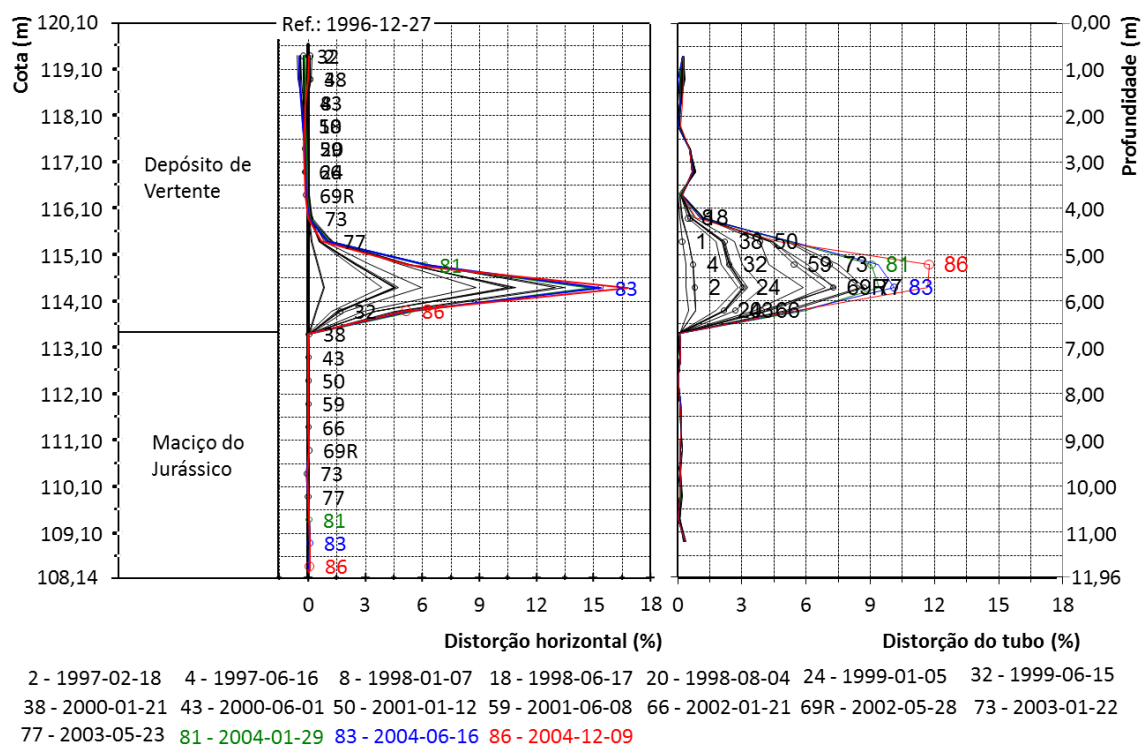


Figura 66 – Perfis de distorção horizontal do solo e de distorção total do tubo numa instalação inclinométrica (adaptado de Carvalho et al., 2016).

Pode concluir-se que  $\gamma_{p,i}^h$  é uma boa ferramenta para prever a vida útil de instalações inclinométricas. Contudo,  $\gamma_{p,i}^h$  atinge valores limite precocemente, tornando a previsão da distorção máxima mais difícil e dependente do diâmetro do tubo. Embora o uso de  $\gamma_i^t$  seja recente, será conveniente basear a previsão em valores de  $\gamma_i^t$  quando  $\gamma_{p,i}^h$  atinge os limites inferiores do Quadro 15; pois  $\gamma_i^t$  é mais consistente com aqueles limites, independentemente do diâmetro do tubo.

### 5.8.3.2. Estimativa da distorção máxima de tubos inclinométricos em condições de “corte pleno”

Por condição de “corte pleno” entenda-se o corte transversal do tubo com alteração mínima da inclinação (Figura 67). Esta situação pode ocorrer mediante uma superfície de deslizamento entre dois elementos com elevada rigidez, o esmagamento do tubo ou a combinação de ambas as situações. Este fenómeno observa-se normalmente em perfis de deslocamento com progressão bem demarcada e isolada entre duas secções contíguas (in ex.: Anexo V). Nestas condições verifica-se que a deformação limite é muito inferior aos valores referidos por Carvalho (1997) e Carvalho et al. (2016), havendo o risco<sup>1</sup> de interrupção da observação com distorções horizontais inferiores a 2% ( $\gamma_h$ , (27), 5.8.1). Nesta secção apresenta-se uma análise deste tipo de anomalia, sugerindo-se que, nestes casos, a capacidade de circulação da sonda é governada pela distribuição de forças no ponto de encontro entre os elementos rolantes e um determinado obstáculo a ultrapassar.

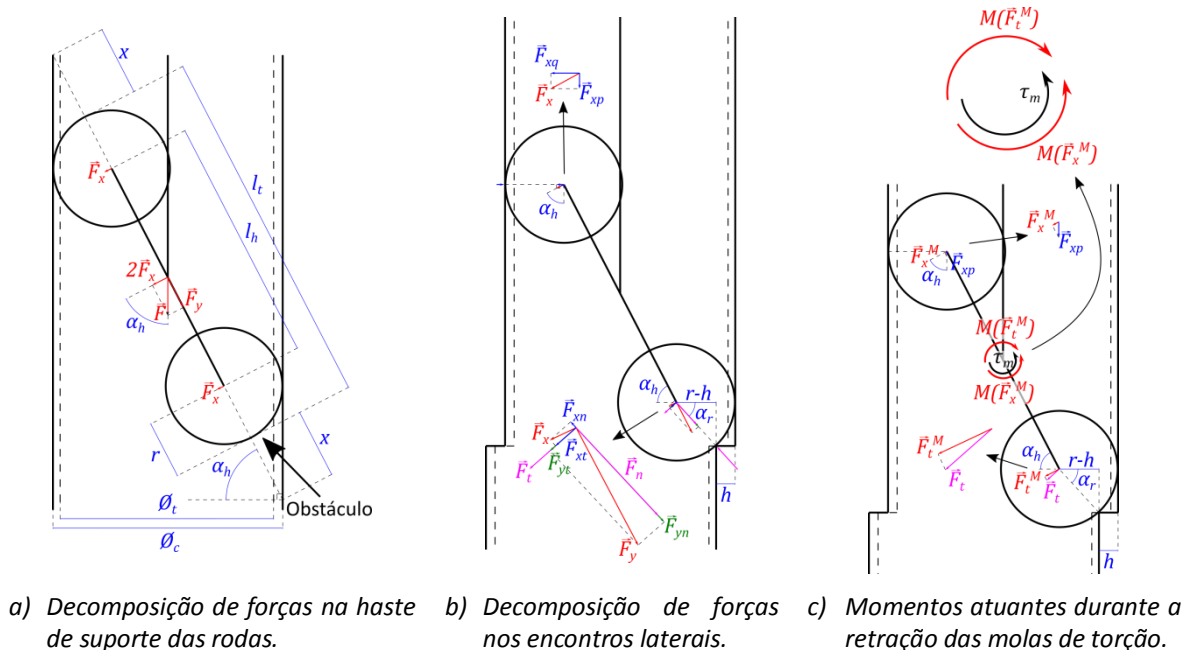


Figura 67 – Concetualização geral da deformação de um tubo em condição de “corte pleno” e da mecânica associada à transposição de um obstáculo lateral pelas rodas inclinométricas.

<sup>1</sup> Este tipo de obstrução é claramente sentido pelo operador durante a execução de campanhas inclinométricas. Frequentemente, a tendência é forçar a passagem do instrumento, mas esta prática pode afetar os sensores inclinométricos (2.2.4; 2.2.5.4) e representa um sério risco de prisão da sonda no interior da instalação (4.3.2), mesmo após a circulação bem sucedida da sonda placebo (Figura 15, 2.4.3). Portanto, sugere-se a manutenção de um registo deste tipo de situações e a substituição atempada dos respetivos tubos, ou a adoção doutro sistema de observação que seja mais adequado (in ex.: Quadro 2, 1.3).

Na Figura 67a ilustra-se a distribuição das forças que derivam da aceleração gravítica quando uma sonda alcança um obstáculo à sua circulação numa das calhas de rodagem dum tubo perfeitamente vertical. A haste que suporta as rodas é oblíqua ao eixo longitudinal do tubo e forma um ângulo  $\alpha_h$  com o plano normal àquele eixo. Consequentemente, a distância total entre as paredes internas do tubo, no plano da haste, corresponde ao comprimento da haste ( $l_h$ ) adicionado do diâmetro da roda ( $2r$ ) e de um comprimento suplementar  $2x$ .

As variáveis  $\alpha_h$  e  $x$  podem determinar-se resolvendo o sistema de equações (46), onde  $r$  é o raio da roda,  $\emptyset_c$  é a distância entre as paredes internas das calhas de rodagem no plano normal ao eixo do tubo, e  $l_t$  é o comprimento entre rodas no plano da haste que as suporta. Os valores de  $\emptyset_c$ ,  $l_h$  e  $r$  podem obter-se por medição direta ou, se possível, através de catálogos comerciais<sup>1</sup>.

$$\begin{cases} r = (r + x) \cos \alpha_h \\ \emptyset_c = (l_t + 2x) \cos \alpha_h \end{cases}; l_t = l_h + 2r \Leftrightarrow \begin{cases} x = \frac{r l_h}{\emptyset_c - 2r} - r \\ \alpha_h = \cos^{-1} \frac{\emptyset_c - 2r}{l_h} \end{cases} \quad (46)$$

Conhecendo-se  $\alpha_h$ , as componentes  $F_x$  e  $F_y$  podem obter-se pela expressão (47), onde  $\varphi$  é o ângulo de inclinação do tubo inclinométrico relativamente ao plano de referência do instrumento ((29), 5.8.1). A subsequente decomposição destas variáveis nas zonas de encontro com as paredes do tubo (Figura 67b) determina-se pelas expressões (48) e (49), respetivamente, sendo  $h$  a dimensão do obstáculo,  $F_{xt}$  e  $F_{xn}$  as componentes de  $F_x$  tangencial e normal no ponto de encontro com  $h$ , respetivamente,  $F_{xp}$  e  $F_{xq}$  as componentes de  $F_x$  no extremo oposto de  $l_h$ ,  $F_{yt}$  e  $F_{yn}$  as componentes de  $F_y$  tangencial e normal no ponto de encontro com  $h$ , respetivamente.

$$\begin{cases} F_x = F \cos(\alpha_h + \varphi)/2 \\ F_y = F \sin(\alpha_h + \varphi) \end{cases} \quad (47)$$

$$\begin{cases} F_{xt} = F_x \cos(\alpha_r - \alpha_h) \\ F_{xn} = F_x \sin(\alpha_r - \alpha_h) \\ F_{xp} = F_x \cos \alpha_h \\ F_{xq} = F_x \sin \alpha_h \end{cases}; \alpha_r = \cos^{-1}(1 - h/r) \quad (48)$$

$$\begin{cases} F_{yt} = F_y \sin(\alpha_h - \alpha_r) \\ F_{yn} = F_y \cos(\alpha_h - \alpha_r) \end{cases}; \alpha_r = \cos^{-1}(1 - h/r) \quad (49)$$

Como se depreende, é impossível que a roda da sonda transponha  $h$  quando este atinge a dimensão do raio  $r$ . No entanto, a interrupção do tubo pode ser anterior, dependendo da magnitude e da orientação das componentes  $F_{xt}$ ,  $F_{yt}$  e  $F_{xp}$ . Neste sentido,  $F_{xt}$  e  $F_{yt}$  representam uma força tangencial favorável à transposição do obstáculo ( $F_t$ ) e  $F_{xp}$  representa uma força normal a  $l_h$  que se opõe a essa transposição.

<sup>1</sup> Considerando um sistema clássico DGSI (2013c),  $l_h$  e  $2r$  foram estimados por medição direta em 64,24 mm e 31,53 mm, respetivamente. A distância entre calhas em tubos de alumínio consta na Figura 18 (3.2.3).

Na Figura 67d observa-se a presença de 3 momentos que atuam no ponto de ligação da haste ao corpo da sonda:

- $M(F_t^M)$  em sentido favorável, correspondendo  $F_t^M$  à componente de  $F_t$  que atua no plano normal ao de  $l_h$ ;
- $M(F_x^M)$  em sentido desfavorável, correspondendo  $F_x^M$  à componente de  $F_{xp}$  que atua no plano normal ao de  $l_h$ ;
- $\tau_m$ , correspondente ao torque exercido pelas molas centralizadoras.

O torque das molas inferiores é compensado pelo torque das molas superiores, uma vez que a retração das primeiras conduz à expansão das segundas. Se  $\tau_m$  for excluído, o sucesso na transposição do obstáculo depende unicamente de  $F_t^M$  (50) e de  $F_x^M$  (51). No entanto, há um diferencial de torque a vencer porque  $\tau_m$  aumenta proporcionalmente à retração das molas (Anexo V). Portanto, as molas são incapazes de recolher quando a condição (52) se verifica (Figura 67d), sendo  $\Delta\tau_m$  o diferencial de torque resultante da retração e expansão do binómio de molas.

$$F_t^M = F_t \cos(\alpha_r - \alpha_h); F_t = F_{xt} + F_{yt} \quad (50)$$

$$F_x^M = F_{xp} \cos \alpha_h \quad (51)$$

$$M(F_t^M) - M(F_x^M) \leq \Delta\tau_m \Leftrightarrow (F_t^M - F_x^M) l_h / 2 - \Delta\tau_m \leq 0 \quad (52)$$

Assim, dependendo do momento linear da sonda aquando do encontro com o obstáculo, considera-se que o valor máximo de distorção em situação de “corte pleno” ( $\gamma_m^{cp}$ ) se situa no intervalo:

$$(F_t^M - F_x^M) l_h / 2 - \Delta\tau_m = 0 \leq \gamma_m^{cp} \leq F_t^M - F_x^M = 0 \quad (53)$$

sendo  $L$  o passo de leitura e  $\varphi$  o ângulo de inclinação do tubo em:

$$\gamma_m^{cp} = 100 \frac{h}{L \cos \varphi} \quad (54)$$

O cálculo de  $\gamma_{cp}$  deve basear-se em  $\gamma_h$  ((28), 5.8.1) e não em  $\gamma_t$  ((45), 5.8.3.1). Pois, o segundo exprime a deformação do tubo nos pontos de transição entre secções contíguas, enquanto aqui interessa o desenvolvimento de deslocamentos em cada secção. Pela mesma razão, o cálculo de  $\gamma_{cp}$  deve considerar a resultante dos deslocamentos incrementais em detrimento da resultante dos deslocamentos acumulados ((19), 5.4):

$$\gamma_{p,i}^{cp} = 100 \frac{\Delta d_{p,i}^R}{L \cos \varphi_{p,i}} \quad (55)$$

Desta forma, o ângulo  $\varphi_{p,i}$  pode estimar-se em função da resultante dos deslocamentos incrementais da respetiva secção (56), uma vez que o deslocamento máximo em situação de “corte pleno” é muito pequeno e, por isso, tem pouca influência no resultado. Outra opção seria considerar uma média dos ângulos de inclinação obtidos nas secções  $i - 1$  e  $i + 1$ .



$$\varphi_{p,i} = \sin^{-1} \frac{\Delta d_{p,i}^R - \Delta d_{p,i-1}^R}{L} \quad (56)$$

A expressão (57) permite estimar o torque exercido por uma mola de torção, sendo  $E$  o módulo de elasticidade do material que constitui a mola,  $d$  o diâmetro do fio,  $T$  a rotação relativa dos braços,  $N_t$  o número de voltas da bobina de torção e  $D$  o diâmetro médio da mesma (S&T, 2018).

$$\tau_m = \frac{Ed^4T}{10,8N_tD} \quad (57)$$

Com base nesta formulação, apresenta-se no Anexo V uma estimativa da variação de torque útil  $([(F_t^M - F_x^M) l_h/2 - \Delta\tau_m]/F)$  em função de  $h$  para tubos verticais. No mesmo anexo apresentam-se também curvas de momento útil  $(F_t^M/F, F_x^M/F)$  para tubos verticais.

Conhecendo-se o peso da sonda inclinométrica e partindo da informação acima referida, torna-se possível estimar um intervalo de valores máximos de distorção e de deslocamento, em função do diâmetro e da inclinação dum tubo inclinométrico. Na Figura 68 apresenta-se o resultado dessa estimativa para uma sonda do sistema clássico DGSi (2013c)<sup>1</sup> em tubos com inclinações compreendidas entre  $\pm 5^\circ$ . Sabendo-se que as instalações inclinométricas têm normalmente inclinações dentro daquele intervalo, sugerem-se os valores limite apresentados no Quadro 17.

Desta análise conclui-se:

- Nestas condições, tubos largos podem inviabilizar as observações anteriormente a tubos estreitos, uma vez que a componente  $F_x^M$  é maior para menores valores de  $\alpha_h$ .
- A inclinação do tubo afeta o valor de  $\gamma_m^{cp}$ , uma vez que altera a distribuição de forças. Pela Figura 67b compreende-se que  $F_{yt}$  diminui à medida que  $h$  aumenta, tomando valores negativos para  $\alpha_r > \alpha_h$ . Por esta razão, inclinações no sentido contrário ao da progressão dos deslocamentos são favoráveis porque reduzem a componente  $F_{yn}$  e aumentam  $F_{xt}$ .
- A transposição de um obstáculo será sempre mais fácil durante a subida do instrumento devido à tração adicional exercida no cabo. No entanto, a condição (53) mantém-se.
- A validação experimental do conceito confirma o princípio de distribuição de forças ilustrado na Figura 67 (Anexo V)<sup>2</sup>, mas demonstra que os valores limite indicados no Quadro 17 são provavelmente excessivos. Ou seja, a altura de queda necessária para ultrapassar um obstáculo aumenta abruptamente e torna inviável a execução de campanhas inclinométricas. É pouco provável que o limite de deformação ultrapasse 10 mm ( $\gamma_{cp} \cong 2\%$ ), independentemente do diâmetro do tubo<sup>3</sup>.
- Os inclinómetros podem não ser os instrumentos mais adequados a este tipo de situação, designadamente quando a gama de valores admissíveis ultrapassa os limites estimados.

<sup>1</sup> Massa de 1,4 kg.

<sup>2</sup> Confirma-se maior dificuldade em ultrapassar um obstáculo com determinada dimensão em tubos mais largos, como também se verifica a relação entre o sentido de inclinação e a maior ou menor dificuldade de circulação da sonda face ao mesmo obstáculo.

<sup>3</sup> Note-se que apesar do limite máximo teórico ser superior em tubos estreitos (Quadro 17), quanto mais estreito é o tubo maior é o diferencial de torque ( $\Delta\tau_m$ ) a vencer (Anexo V).

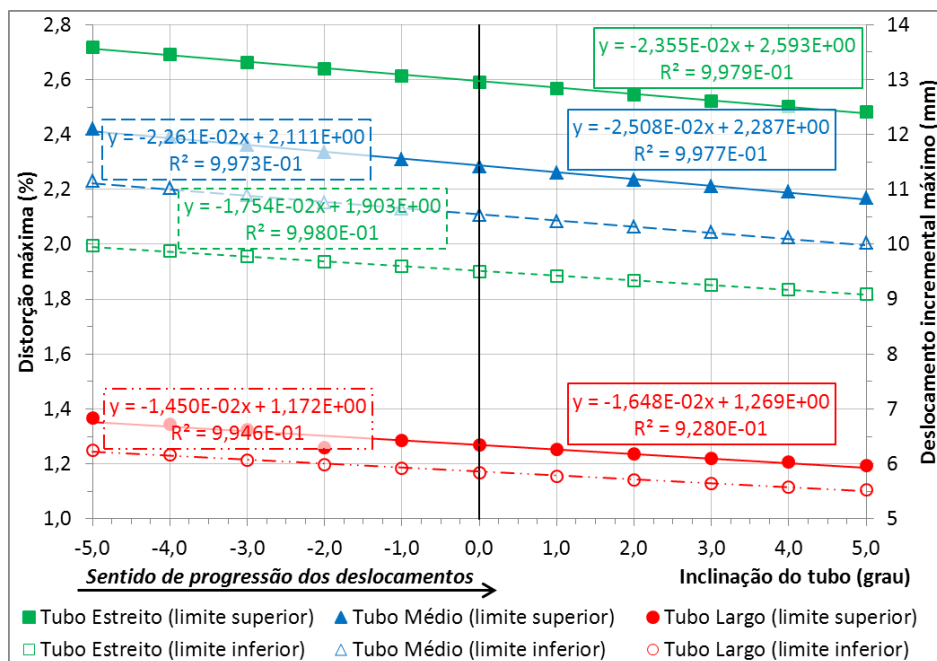


Figura 68 – Valores máximos de distorção e de deslocamento para uma instalação inclinométrica vertical em condição de “corte pleno” e com inclinação compreendida entre  $\pm 5^\circ$ .

Quadro 17 – Valores máximos de deformação de um tubo inclinométrico em condição de “corte pleno”.

Tubo	Limites inferiores		Limites superiores	
	$h$ [mm]	$\gamma_m^{cp}$ [%]	$h$ [mm]	$\gamma_m^{cp}$ [%]
Estreito	9,06	1,82	13,53	2,72
Médio	9,98	2,00	12,05	2,42
Largo	5,50	1,10	6,81	1,37

### 5.9. Estimativa de momentos de flexão em elementos estruturais

Os momentos de flexão em elementos estruturais<sup>1</sup> são frequentemente estimados a partir de deslocamentos medidos através de meios extensométricos ou topográficos. Estes podem-se também estimar a partir dos deslocamentos inclinométricos (Boeckmann et al., 2014; Dunnicliff, 1988; Ooi & Ramsey, 2003).

O momento de flexão ( $M$ ) de um elemento estrutural relaciona-se com a curvatura resultante do esforço que lhe é imposto através da equação (58), onde  $\psi$  é a curvatura do elemento fletido,  $E$  é o módulo de elasticidade do material e  $I$  é o respetivo momento de inércia.

$$M = \psi EI \quad (58)$$

Quando  $M$  resulta da medição de deslocamentos laterais, em detrimento de medições extensométricas,  $\psi$  pode calcular-se de acordo com equação (59), sendo  $w$  o deslocamento na secção

<sup>1</sup> Por exemplo, em fundações profundas, estacas cravadas ou muros de contenção.

considerada e  $z$  a extensão do eixo neutro do elemento fletido nessa secção. Como  $dw/dz$  é frequentemente próximo de zero, é comum aplicar-se a formulação aproximada (60) (Boeckmann et al., 2014; Ooi & Ramsey, 2003).

$$\psi = \frac{\frac{d^2w}{dz^2}}{\left[1 + \left(\frac{dw}{dz}\right)^2\right]^{3/2}} \quad (59)$$

$$\psi \approx \frac{d^2w}{dz^2} \quad (60)$$

A curvatura pode também exprimir-se pelo inverso do raio ( $r$ ) duma circunferência que contenha o arco  $dz$ , conforme a expressão (61). Boeckmann et al. (2014) consideram  $dz \cong L$  (in ex.: o passo de leitura) e estimam a curvatura em cada secção de tubo de acordo com a equação (62), onde  $\varphi_{p,i}$  e  $\varphi_{p,i-1}$  são os ângulos da resultante dos deslocamentos acumulados da campanha ordinária  $p$  nas secções  $i$  e  $i - 1$ , respetivamente ((29), 5.8.1).

$$\psi = 1/r = \frac{d\theta}{dz} \quad (61)$$

$$\psi \cong \Delta\theta/L = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{L} \quad (62)$$

No entanto, sabe-se que o raio ( $r$ ) de uma circunferência se relaciona com uma corda nela inscrita ( $L$ ) através da expressão (63), pelo que se pode determinar a curvatura em cada secção inclinométrica através da equação (64). Esta metodologia equivale ao ajuste de um arco de circunferência com intervalo móvel de duas medições (Figura 69a; Ooi & Ramsey, 2003). Uma variante deste método utiliza um intervalo móvel de três medições ((65), Figura 69b).

$$L = 2r \sin(\theta/2) \Leftrightarrow r = \frac{L}{2 \sin \alpha}; \quad \alpha = \frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2} \quad (63)$$

$$\psi = 2 \sin\left(\frac{\varphi_i - \varphi_{i-1}}{2}\right)/L \quad (64)$$

$$\psi = 1/r = \frac{4A_{abc}}{abc}; \quad \left\{ \begin{array}{l} a = \sqrt{(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i}^R)^2 + (z_{i-1} - z_i)^2} \\ b = \sqrt{(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i+1}^R)^2 + (z_{i-1} - z_{i+1})^2} \\ c = \sqrt{(\Delta D_{p,i}^R - \Delta D_{p,i+1}^R)^2 + (z_i - z_{i+1})^2} \\ A_{abc} = \frac{z_{i-1}(\Delta D_{p,i+1}^R - \Delta D_{p,i}^R) + z_i(\Delta D_{p,i-1}^R - \Delta D_{p,i+1}^R) + z_{i+1}(\Delta D_{p,i}^R - \Delta D_{p,i-1}^R)}{2} \end{array} \right. \quad (65)$$

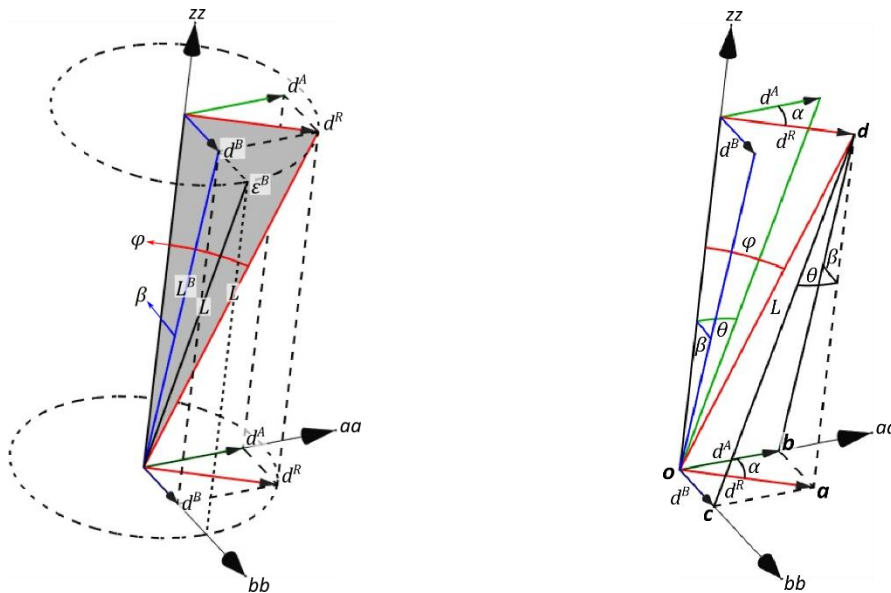
O ajuste de funções polinomiais a um conjunto de medições, com posterior aplicação da equação (60) para obtenção de  $\psi$  é muito frequente. Ooi & Ramsey (2003) analisam 12 metodologias distintas aplicadas a um conjunto de 60 casos de estudo. As metodologias estudadas são:

- ajuste de curvas quadráticas com intervalo móvel de 3, 5 e 7 medições;
- ajuste de curvas cúbicas com intervalo móvel de 4 a 8 medições;



### 5.10. Método alternativo de processamento de dados inclinométricos

Tal como apresentado em 5.2, os dados inclinométricos são processados independentemente nas direções  $A$  e  $B$ . Esta metodologia de cálculo contém um erro intrínseco<sup>1</sup> pelo facto de se considerar o valor  $L$  em cada direção independentemente da orientação da resultante dessas componentes (Figura 70). Lei et al. (2006) analisam esta questão e demonstram que os desvios nas direções  $A$  e  $B$  são interdependentes e correlacionáveis. Os autores apresentam também uma formulação alternativa que incorpora as medições de ambas as direções no cálculo de cada uma, de forma a eliminar o erro referido. Nesta secção apresenta-se a dedução daquele método de cálculo.



a) Comparação entre o segmento de tubo verdadeiro ( $L^B$ ) e aquele considerado no cálculo ( $L$ ). b) Relação entre ângulos e arestas do troço de tubo lido ( $L$ ) e das componentes nas direções  $A$  e  $B$ .

Figura 70 – Interdependência entre o cálculo de desvios nas direções  $A$  e  $B$  (adaptado de Lei et al., 2006).

Na Figura 70a observa-se um esquema representativo de um troço de tubo ( $L$ ) medido por meios inclinométricos. Utilizando a mesma simbologia da Figura 59c (5.8.1),  $\varphi$  representa o ângulo entre aquele troço e o plano de referência do instrumento ( $zz$ ) e  $\beta$  corresponde ao ângulo medido na direção  $B$  ( $bb$ ). O método convencional de cálculo ((15), 5.2) considera  $L$  para obtenção de  $d^B$  a partir de  $\beta$ , mas na verdade o troço a considerar deveria ser  $L^B$ . Consequentemente, o desvio calculado é  $d^B + \varepsilon^B$ , sendo  $\varepsilon^B$  o erro intrínseco ao método de cálculo normalmente utilizado. Este erro é pequeno para pequenas inclinações, mas cresce em função de  $\varphi$  e da orientação azimutal da resultante  $d^R$  ( $\alpha$ , Figura 70b).

Na Figura 70b observa-se que as tangentes dos ângulos  $\theta$  e  $\beta$  se podem exprimir através da equa-

<sup>1</sup> Este será um dos motivos para que os fabricantes de inclinómetros condicionem as especificações técnicas a instalações com inclinação máxima  $\pm 3 - 5^\circ$  (in ex.: Green, in: BGS, 1974; DGSi, 2013c; GEOKON, 2009a, 2014c, 2016b; SISGEO, 2011; SOIL, 2014c).

ção (68), cuja soma de quadrados resulta na equação (69).

$$\begin{cases} \tan \theta = \frac{\overline{ac}}{\overline{ad}} = \frac{\overline{oa} \cos \alpha}{L \cos \varphi} = \cos \alpha \tan \varphi \\ \tan \beta = \frac{\overline{ab}}{\overline{ad}} = \frac{\overline{oa} \sin \alpha}{L \cos \varphi} = \sin \alpha \tan \varphi \end{cases}; \cos \varphi = \frac{\overline{ad}}{L} \quad (68)$$

$$\tan^2 \theta + \tan^2 \beta = \tan^2 \varphi \quad (69)$$

Sabendo-se que  $\cos x = \pm 1/\sqrt{1 + \tan^2 x}$ , a equação (69) pode reescrever-se em função de  $\sin \varphi$  ((70)), tornando possível a expressão da resultante dos desvios ( $d^R$ ) em função do ângulo de inclinação do troço de tubo medido ((71)).

$$\sin \varphi = \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \quad (70)$$

$$d^R = L \sin \varphi = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \quad (71)$$

A orientação azimutal de  $d^R$  ( $\alpha$ ) obtém-se a partir da equação (68):

$$\tan \beta / \tan \theta = \sin \alpha / \cos \alpha \Leftrightarrow \alpha = \tan^{-1}(\tan \beta / \tan \theta) \quad (72)$$

Na Figura 70b constata-se também que as componentes  $d^A$  e  $d^B$  se podem obter em função da respetiva resultante ( $d^R$ ) e do ângulo  $\alpha$ :

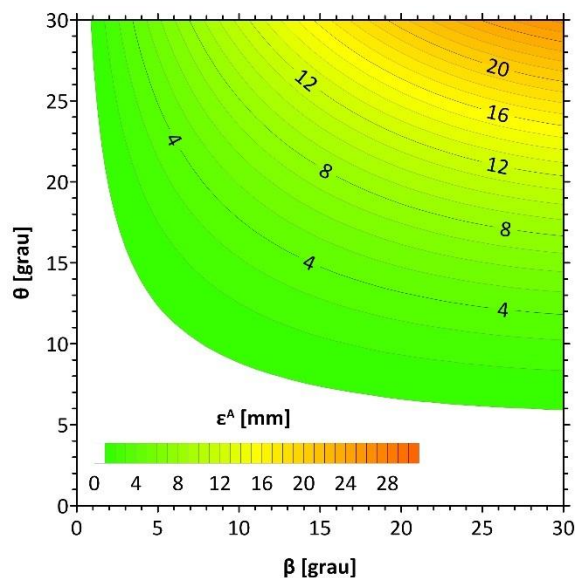
$$\begin{cases} d^A = d^R \cos \alpha \\ d^B = d^R \sin \alpha \end{cases} \quad (73)$$

Substituindo as equações (68) e (71) na equação (73), é possível exprimir o desvio em cada direção considerando os ângulos medidos em ambas:

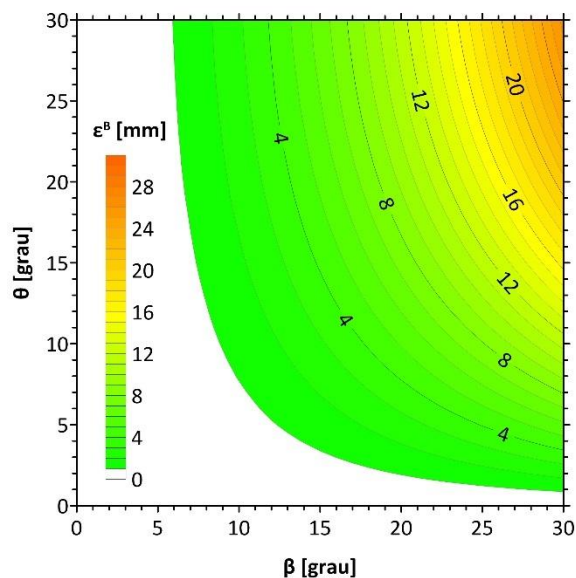
$$\begin{cases} d^A = L \sin \varphi \frac{\tan \theta}{\tan \varphi} = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \frac{\tan \theta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} = L \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \\ d^B = L \sin \varphi \frac{\tan \beta}{\tan \varphi} = L \sqrt{\frac{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \frac{\tan \beta}{\sqrt{\tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} = L \frac{\tan \beta}{\sqrt{1 + \tan^2 \theta + \tan^2 \beta}} \end{cases} \quad (74)$$

Conclui-se que o método de cálculo convencional (5.2) produz resultados corretos apenas quando se verificam desvios ou deslocamentos numa única direção (in ex.:  $d^A = 0$  v  $d^B = 0$ ;  $\Delta d^A = 0$  v  $\Delta d^B = 0$ ). Lei et al. (2006) procedem à validação experimental da nova metodologia e concluem que o erro de cálculo afeto ao método convencional é negligenciável na maioria das situações.

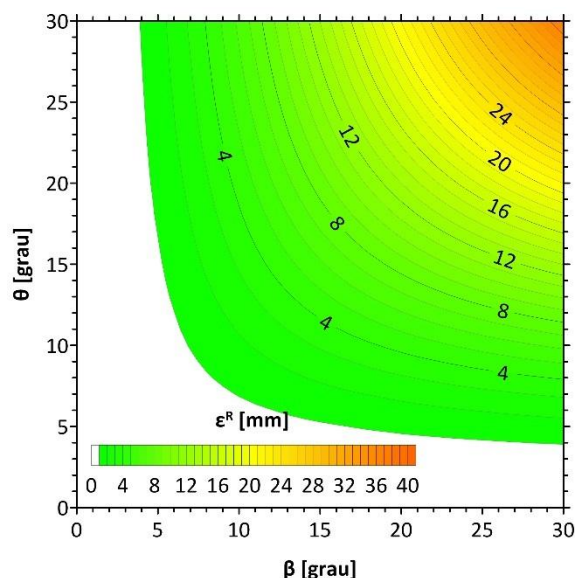
Na Figura 71 apresentam-se os valores de erro do método de cálculo convencional para desvios ( $d$ ) ou deslocamentos incrementais ( $\Delta d$ ) nas direções  $A$  (Figura 71a) e  $B$  (Figura 71b), para a resultante daquelas componentes ( $d^R$  ou  $\Delta d^R$ , respetivamente, Figura 71c) e para a respetiva orientação ( $\alpha$ , Figura 71d). Esta análise baseia-se na diferença entre os valores obtidos pelos dois métodos de cálculo em função da inclinação atribuída às direções  $A$  e  $B$ .



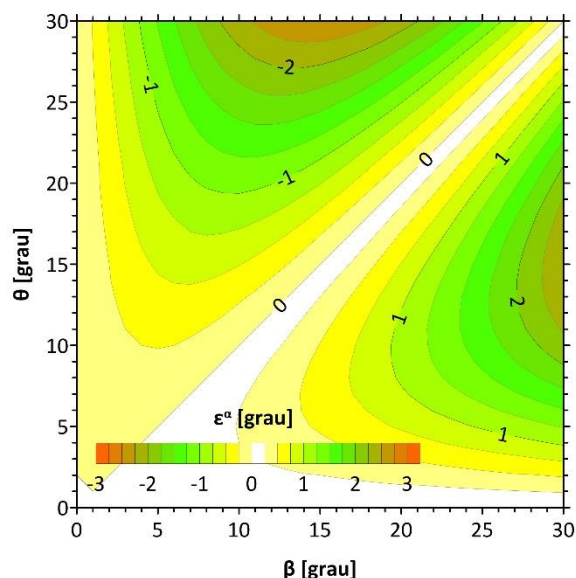
a) Erro no cálculo de  $d^A$  ou de  $\Delta d^A$  ( $\varepsilon^A$ ).



b) Erro no cálculo de  $d^B$  ou de  $\Delta d^B$  ( $\varepsilon^B$ ).



c) Erro no cálculo de  $d^R$  ou de  $\Delta d^R$  ( $\varepsilon^R$ ).



d) Erro no cálculo de  $\alpha$  ( $\varepsilon^\alpha$ ).

Figura 71 – Erro de cálculo do método convencional de processamento de dados. Determinação das componentes de desvio ( $d$ ) ou de deslocamento incremental ( $\Delta d$ ) nas direções  $A$  e  $B$ , da resultante dos desvios ( $d^R$ ) ou dos deslocamentos incrementais ( $\Delta d^R$ ), e da respetiva orientação ( $\alpha$ ).

Na Figura 71 demonstra-se que o erro do método de cálculo convencional cresce proporcionalmente à inclinação do tubo e é máximo quando ambas as componentes têm a mesma magnitude (in ex.:  $\alpha = 45^\circ$ ), sendo o erro no cálculo da orientação da resultante mínimo para  $\alpha = 0^\circ \vee \alpha = 45^\circ$  e máximo para  $\alpha = 45 \pm 22,5^\circ$ . Contudo, a magnitude do erro é de facto desprezável na vizinhança do plano de referência instrumental (in ex.:  $-5^\circ \leq \{\theta; \beta\} \leq 5^\circ$ ). Portanto, com exceção de aplicações inclinométricas específicas, o método de cálculo convencional é adequado, mesmo não se justificando a sua manutenção do ponto de vista operacional.

## **5.11. InclinoReport: programa de processamento de dados inclinométricos**

### **5.11.1. Considerações iniciais**

O processamento de dados inclinométricos faz-se normalmente com recurso a programas informáticos. De um modo geral, os programas comerciais implementam rotinas de análise e de correção de dados (5.11.2). No entanto, estas ferramentas raramente são utilizadas e os fluxos de trabalho não incluem a revisão sistemática da qualidade dos dados, seja por desconhecimento ou pela morosidade que o processo implica.

O InclinoReport (Coimbra, 2007) é um programa de processamento de dados inclinométricos desenvolvido e sistematicamente utilizado no Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). No entanto, a implementação de rotinas de análise e de correção de dados neste programa encontra-se ainda muito subdesenvolvida (5.11.4).

Nesta secção resumem-se as principais funcionalidades dos programas informáticos dedicados à gestão e ao processamento de dados inclinométricos, tendo como objetivo a avaliação comparativa do InclinoReport (Coimbra, 2007). Com base nesta informação, discutem-se aqui as vantagens e os inconvenientes da versão atual do programa e na secção 7.9 apresenta-se um plano de desenvolvimento futuro deste programa com a finalidade de otimizar as ferramentas e as metodologias de trabalho existentes, e de incluir no programa novas funcionalidades. Acredita-se que a implementação das alterações propostas em 7.9 contribuirá para o aumento da produtividade e para redução dos custos associados às operações relacionadas com a observação geotécnica por meios inclinométricos.

### **5.11.2. Características comuns à generalidade dos programas de processamento de dados inclinométricos**

Os fabricantes de inclinómetros fornecem normalmente programas desenvolvidos pelos próprios, sem custos adicionais, que permitem executar as tarefas mais comuns, como sejam (DGSI, 2014c; RST, 2018; SISGEO, 2018; SOIL, 2014f, 2019):

- gestão das bases de dados inclinométricas, normalmente em formatos não padronizados;
- comunicação com as unidades de aquisição para envio de configuração e recolha de dados;
- edição de leituras inclinométricas, da informação da obra e das respetivas instalações;
- criação dos gráficos mais básicos (in ex.: desvios e deslocamentos acumulados);
- importação/exportação de dados para um ou mais formatos padronizados (in ex.: CSV<sup>1</sup>,

---

<sup>1</sup> CSV (*comma-separated values*) é um formato de ficheiro amplamente utilizado para suporte temporário de dados durante a transferência entre duas plataformas incompatíveis. O formato baseia-se simplesmente numa tabela de valores separados por vírgulas ou por pontos e vírgulas, podendo a primeira linha conter, ou não, os títulos das colunas.



PCSLIN<sup>1</sup>, RPP<sup>2</sup> ou GTL<sup>2</sup>).

De um modo geral, estes fabricantes também disponibilizam versões mais avançadas de *software* que permitem outro tipo de operações, como sejam (DELLC, 2018; DGSi, 2014c; RST, 2018; SISGEO, 2017b; SOIL, 2014f, 2019):

- análise estatística das somas das leituras;
- correção de erros sistemáticos generalizados (in ex.: *bias-shift* – 6.4.2, rotação – 6.4.3, profundidade – 6.4.4, sensibilidade – através de parâmetros de calibração – Anexo IV, e torção das calhas de rodagem – 6.4.6);
- criação de outro tipo de gráficos (in ex.: evolução e orientação da resultante dos deslocamentos – 5.4; 5.5);
- definição do perfil litológico;
- importação/exportação de dados noutros formatos, gráficos ou de texto;
- rotação axial das direções *A* e *B* (in ex.: correção da orientação azimutal das calhas de rodagem através da equação (102) – 6.4.3 – atribuindo as direções *A* e *B* às coordenadas *y* e *x*, respetivamente).

Existem outras soluções destinadas à observação integrada de múltiplos dispositivos. Estas destinam-se normalmente à observação de instrumentação fixa, pelo que não serão aqui abordadas.

Apesar da disponibilização de *software* grátis por parte dos fabricantes, não é incomum as entidades que processam os dados inclinométricos optarem por fazê-lo por outros meios (in ex.: folhas de cálculo ou programas desenvolvidos internamente), seja por desconhecimento das ferramentas disponíveis, por incapacidade do *software* comercial em responder a necessidades específicas, ou pela transmissão de práticas internas que remontam a décadas passadas.

### 5.11.3. Histórico e caracterização técnica do InclinoReport

O programa atualmente utilizado no NGUT intitula-se InclinoReport (Coimbra, 2007) e foi desenvolvido entre abril e dezembro de 2006. Este programa encontra-se atualmente na versão 0.1.4.8, a qual exprime o estado de desenvolvimento relativamente ao plano inicial (in ex.: versão 1.0). Embora o desenvolvimento não tenha atingido o plano inicial, o InclinoReport é um programa inteiramente funcional desde a sua conceção e tem sido continuamente utilizado em ambiente profissional desde 2007.

O InclinoReport foi inteiramente desenvolvido em Visual Basic (VB) e opera estritamente em am-

---

<sup>1</sup> PCSLIN e RPP são dois formatos de ficheiro muito utilizados para armazenar dados inclinométricos e para os transferir entre plataformas distintas. Os formatos provêm dos primeiros programas de processamento de dados inclinométricos e têm estruturas muito semelhantes, caracterizando-se por um cabeçalho com a identificação da obra, informações sobre a instalação e o instrumento utilizado, seguido dos dados inclinométricos em ordem ascendente ou descendente.

<sup>2</sup> GTL é um formato de ficheiro que provém de versões descontinuadas do programa GTILT, desenvolvido pela empresa Mitre Software Corporation e muito utilizado para processamento de dados inclinométricos.

biente gráfico de sistemas Microsoft Windows XP ou superior (MSW). Os ficheiros de dados têm um formato próprio, anteriormente utilizado pelo DG. Estes ficheiros são complementados por um ficheiro de dados adicionais<sup>1</sup> que contém outras informações complementares, tais como a constante instrumental (5.1), o histórico de referências (5.6), a diferença tubo-terreno (5.7), entre outras. Para além destes, há ainda dois tipos de ficheiro opcional:

- Opções (OPT): contém as opções de saída gráfica de cada instalação, incluindo as profundidades a processar para os resultados de evolução de deslocamentos ao longo do tempo.
- Estratigrafia (STR): contém o perfil litológico de cada instalação.

O suporte de saída do InclinoReport é Microsoft Office Excel (MSOE). Inicialmente estavam previstos outros suportes adicionais, sendo o MSOE apenas uma opção. No entanto, este foi o primeiro suporte a ser implementado, não tendo havido oportunidade para implementar outros até à data.

Relativamente ao suporte de saída importa referir o seguinte:

- o MSOE é um bom suporte, porque é utilizado pela maioria da população e permite a produção de ficheiros pequenos que incluem a informação de todas as campanhas de uma determinada instalação, juntamente com a respetiva representação gráfica de resultados;
- o MSOE não deveria ser o único suporte de saída porque é um formato detido por uma entidade terceira que pode sofrer alterações imprevistas.

O desenvolvimento inicial do InclinoReport deu-se aquando da utilização do MSOE 2003, cujo formato de ficheiro correspondente é proprietário (XLS). O MSOE 2003 disponibilizava módulos de acesso aos quais o InclinoReport acedia para executar as tarefas necessárias. Aquando do lançamento da versão do Microsoft Office (MSO) 2007, a Microsoft padronizou os formatos de ficheiro do pacote de *software* MSO, passando os ficheiros do MSOE (in ex.: tipo XLSX) a ter um formato aberto, designado Office Open XML (OOXML; Ngo, 2006). Esta alteração impediu o acesso direto aos módulos de novas versões do MSO, passando a comunicação a fazer-se através do .NET Framework SDK<sup>2</sup> (.NET).

Consequentemente, o InclinoReport foi parcialmente reescrito em 2014, aquando da introdução do MSO 2010 nas estações de trabalho do NGUT, de forma a compatibilizá-lo com novas versões do MSOE e com os padrões atuais de desenvolvimento integrado em ambiente MSW (.NET).

#### 5.11.4. Funcionalidades do InclinoReport

Desde a sua conceção, o InclinoReport contém as seguintes funcionalidades:

---

<sup>1</sup> O ideal seria que a informação constante neste ficheiro estivesse incorporada no ficheiro de dados, mas esta solução não foi possível durante o período de desenvolvimento inicial do programa.

<sup>2</sup> SDK (*software development kit*) é um conjunto de bibliotecas que definem um padrão comum de desenvolvimento computacional e de acesso a determinadas ferramentas de programação. O .NET Framework é um ambiente de execução produzido pela Microsoft.

- identificação da equipa de trabalho;
- definição da diferença tubo-terreno (5.7);
- definição do histórico de referências (5.6);
- seleção da campanha de referência para efeitos de cálculo, a partir do histórico de referências definido;
- definição de um “ponto fixo”<sup>1</sup>;
- definição da cota no topo do tubo;
- definição da profundidade da medição de topo com auxílio de cálculo automático (5.7);
- importação/exportação, criação e edição do perfil litológico;
- validação/anulação manual de campanhas inclinométricas;
- visualização de leituras inclinométricas e dos indicadores estatísticos respetivos (6.3);
- importação/exportação e definição de várias opções de processamento:
  - o 4 tipos distintos de resultados: fichas de campo, geometrias de referência, perfis de deslocamento e evoluções no tempo;
  - o seleção individual das campanhas a incluir em cada tipo de resultado;
  - o seleção dos tipos de gráfico a produzir em cada tipo de resultado;
  - o seleção do tipo de dimensionamento automático da escala gráfica para cada tipo de resultado (in ex.: escala comum a todas as instalações ou adaptada à instalação em causa);
  - o definição das profundidades a incluir no processamento das evoluções no tempo;
  - o definição do número máximo de profundidades a incluir em cada gráfico de evolução.
- outras opções finais de processamento (in ex.: localização e nome dos ficheiros, unidades de medida, inclusão de estratigrafia, legendagem automática de figuras, etc.);
- produção de resultados nas formas gráfica e numérica:
  - o dados inclinométricos e somas de leituras, média (6.3.2) e desvio padrão (6.3.3);
  - o geometrias de referência (in ex.: desvios acumulados das campanhas de referência; 5.2);
  - o perfis de deslocamento acumulado nas direções *A* e *B* (5.3), da resultante dos deslocamentos e respetiva orientação (5.4), e da distorção horizontal (5.6);
  - o evolução no tempo da resultante dos deslocamentos acumulados, ou da distorção horizontal, e da respetiva orientação, em profundidades pré-definidas (5.5).

---

<sup>1</sup> O “ponto fixo” equivale à correção do *bias-shift* pelo método dos deslocamentos acumulados (6.4.2). Note-se que, tal como está implementada, de acordo com a metodologia existente no *software* anteriormente utilizado, esta função afeta sempre todas as campanhas em ambas as direções.

## 6. ANÁLISE QUALITATIVA, VALIDAÇÃO E CORREÇÃO DE DADOS INCLINOMÉTRICOS

### 6.1. Considerações iniciais

Toda e qualquer medição incorpora erros de natureza aleatória e sistemática (JCGM, 2008b). Os erros aleatórios traduzem-se por um intervalo de oscilação de valores (in ex.: repetibilidade ou dispersão) e os erros sistemáticos exprimem-se pela diferença entre o valor obtido e o valor da grandeza a medir (in ex.: exatidão ou desvio). Os primeiros podem ser conhecidos, mas não são passíveis de correção. Os segundos podem ser corrigidos, mas nem sempre é possível proceder à identificação e quantificação dos mesmos.

A análise qualitativa de dados inclinométricos faz-se com recurso a indicadores estatísticos que se obtêm a partir da redundância de leituras (5.1). Estes indicadores são balizados em função do erro típico de cada sistema inclinométrico<sup>1</sup> (6.2). Os procedimentos de validação que se apresentam neste capítulo devem integrar-se nas rotinas de processamento de dados com o objetivo de:

- estimar a fiabilidade dos resultados e verificar o desempenho dos instrumentos;
- detetar a presença de erros sistemáticos e quantificar a sua magnitude;
- proceder à correção dos erros sistemáticos identificados, conforme viável e necessário.

Em sistemas inclinométricos, os erros aleatórios derivam essencialmente da repetibilidade dos sensores e os erros sistemáticos resultam de diversos fatores, tais como (Coimbra, 2011):

- qualidade e estado de conservação da instalação inclinométrica (3);
- operação e manutenção do equipamento inclinométrico (4);
- fatores externos;
- histerese, desvio na origem e deriva dos acelerómetros (2.2).

No Quadro 18 apresenta-se uma listagem das principais fontes de erro inclinométrico. No Quadro 19 apresenta-se um resumo das ações de operação e de manutenção recomendadas para mitigar a ocorrência de erros sistemáticos.

Quadro 18-1 – Principais fontes de erro em medições inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2001, 2000) – *continua na próxima página*.

Componente	Condicionante	
Acelerómetros	<ul style="list-style-type: none"><li>• Desvio na origem e respetiva deriva</li><li>• Alinhamentos mecânicos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Histerese</li><li>• Erro aleatório</li></ul>
Sonda e Rodas	<ul style="list-style-type: none"><li>• Conetores</li><li>• Alinhamentos mecânicos</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Limpeza</li><li>• Elasticidade das molas</li></ul>
Cabo	<ul style="list-style-type: none"><li>• Marcações</li><li>• Alterações dimensionais</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Controlo da profundidade</li><li>• Conectores</li></ul>

<sup>1</sup> Neste contexto, entenda-se por sistema inclinométrico o conjunto *equipamento + instalação*.

Quadro 18-2 – Principais fontes de erro em medições inclinométricas (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2001, 2000) – *continuação*.

Componente	Condicionante	
Unidade de aquisição	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Calibração</li> <li>• Alterações devidas à temperatura</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conectores</li> <li>• Nível de energia</li> </ul>
Tubo inclino-métrico	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Inclinação</li> <li>• Falta de paralelismo das calhas interiores</li> <li>• Curvatura</li> <li>• Preenchimento do espaço anelar</li> <li>• Juntas entre troços</li> <li>• Existência de detritos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deformação</li> <li>• Folga lateral das calhas interiores</li> <li>• Dispositivo de referência para controlo da profundidade</li> <li>• Fixação da base</li> <li>• Profundidade (in ex.: propagação de erros, etc.)</li> </ul>
Fatores externos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Vibrações</li> <li>• Oscilações térmicas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Campos magnéticos</li> <li>• Descargas elétricas</li> </ul>

Quadro 19 – Ações de operação e de manutenção que minimizam a ocorrência de erros sistemáticos (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2006a).

Componente	Prevenção	Ação
Rodas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Movimento lateral</li> <li>• Elasticidade das molas</li> <li>• Suavidade da rotação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpeza</li> <li>• Lubrificação</li> <li>• Aperto adequado</li> </ul>
Parafusos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Folgas (in ex.: alinhamento)</li> <li>• Selagem</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificação regular do aperto</li> </ul>
Conectores e anéis de selagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Desgaste</li> <li>• Corrosão</li> <li>• Deformação</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Limpeza</li> <li>• Lubrificação isenta de solventes clorados</li> <li>• Ligação correta</li> <li>• Arejamento após utilização</li> </ul>
Armazenamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deriva do desvio na origem</li> <li>• Histerese</li> <li>• Corrosão</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Humidade reduzida</li> <li>• Arejamento dos conectores</li> <li>• Posição paralela ao plano de referência</li> </ul>
Transporte e operação	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Protecção contra choques</li> <li>• Controlo da profundidade</li> <li>• Período de aquecimento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Transporte adequado</li> <li>• Controlo adequado da profundidade (in ex.: tolerância de <math>\pm 3</math> mm)</li> <li>• Introdução da sonda no tubo depois de ligada</li> <li>• Permitir pelo menos 5 min de aquecimento</li> </ul>

## 6.2. Erro típico de um sistema inclinométrico

### 6.2.1. Conceito de erro típico, valores de erro especificados e propagação em deslocamentos

O erro de medição em sistemas inclinométricos tem sido repetidamente avaliado (in ex.: Burland & Moore, Cooke & Price, Cornforth, Green, McKenna & Roy, in: BGS, 1974; Dunnicliff, 1972; Gould & Dunnicliff, 1972; Green & Mikkelsen, 1988; Marte & Semprich, 1998; Mikkelsen, 2003; Moormann, 2003). Essa avaliação faz-se normalmente por análise da dispersão de uma série de curvas de desvio (5.2), obtidas numa instalação considerada estável (4.7.2). O desempenho metrológico especificado pelos fabricantes reflete o valor típico dessa dispersão, incluindo o equipamento de medição e respetivos acessórios, a instalação e a permutação de operadores. Estes valores são normalmente expressos em *mm* por *n* metros de tubo, ou por medição, com ou sem discriminação das componentes aleatória e sistemática. Normalmente as especificações técnicas designam

por repetibilidade do sensor a componente aleatória e por repetibilidade do sistema a agregação de ambas as componentes. Contudo, encontram-se variações de designação entre fabricantes.

Introduzindo a ocorrência de erros aleatórios ( $\varepsilon_a$ ) e sistemáticos ( $\varepsilon_s$ ) nas medições inclinométricas, a equação (15) (5.2) pode reescrever-se na forma<sup>1</sup>:

$$d_i = Lm_i \pm \varepsilon_a + \varepsilon_s \quad (75)$$

Sabendo-se que as progressões de  $\varepsilon_a$  e de  $\varepsilon_s$  se fazem à razão de  $\sqrt{n}$  e de  $n$ , respetivamente, sendo  $n$  o número de medições (JCGM, 2008b; Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000), a equação (16) (5.2) pode reescrever-se na forma<sup>1,2</sup>:

$$D_j = \sum_i^j d_i = L \sum_i^j m_i \pm \sqrt{n}\varepsilon_a + n\varepsilon_s; n = j - i + 1 \quad (76)$$

A equação (76) demonstra claramente a importância que o erro sistemático assume nas medições inclinométricas, visto que tem propagação linear em função do número de medições e, portanto, pode tomar proporções muito importantes em resultados acumulados (5.3; 5.4).

Conhecida a lei de propagação do erro ao longo do eixo medido, é possível proceder à estimativa das componentes aleatória e sistemática, mesmo quando estas não se encontram discriminadas nas especificações técnicas (Coimbra, 2011). Em 6.3.3 e no Anexo II exemplifica-se a dedução das componentes de erro típico a partir de especificações técnicas.

No Quadro 20 apresentam-se os valores típicos de erro especificados pelos principais fabricantes de inclinómetros. Convém salientar que aquelas especificações só se aplicam numa amplitude de medição reduzida<sup>3</sup>, visto que ambas as componentes de erro aumentam significativamente com a inclinação do tubo (Marte & Semprich, 1998; Mikkelsen, 2003; Moormann, 2003; SINCO, 2000).

Quadro 20-1 – Desempenho metrológico especificado pelos principais fabricantes de inclinómetros (DGSI, 2013c, adaptado de 2014b; GEOKON, 2014c; RST, 2010; SISGEO, 2011; SOIL, 2014c, 2014g) – *continua na próxima página*.

Fabricante	Modelo	Sensores	Especificações
GEOKON	Inclinometer Probe (6000)	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ calibrada ( $\pm 53^\circ$ mensurável) <sup>i</sup> Resolução: $\pm 0,025/500 \text{ mm}$ Repetibilidade (sensor): $\pm 2 \text{ mm}/30 \text{ m}$ <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 6 \text{ mm}/30 \text{ m}$
	MEMS Inclinometer Probe (6100)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ <sup>i</sup> Resolução: $\pm 0,025/500 \text{ mm}$ Repetibilidade (sensor): $\pm 1 \text{ mm}/30 \text{ m}$ <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 3 \text{ mm}/30 \text{ m}$

<sup>1</sup> Note-se que nas equações (75) e (76)  $\varepsilon_a$  e  $\varepsilon_s$  exprimem-se em unidades métricas ou imperiais, não sendo, portanto, afetadas por  $L$ .

<sup>2</sup> Note-se que a expressão (76) é genérica e pressupõe a ocorrência de  $\varepsilon_s$  em todas as medições (Anexo XII).

<sup>3</sup> Normalmente  $\pm 3 - 5^\circ$  relativamente ao plano de referência do instrumento.

Quadro 20-2 – Desempenho metrológico especificado pelos principais fabricantes de inclinómetros (DGSI, 2013c, adaptado de 2014b; GEOKON, 2014c; RST, 2010; SISGEO, 2011; SOIL, 2014c, 2014g) – *continuação*.

Fabricante	Modelo	Sensores	Especificações
SISGEO	Vertical Inclinometer Probe (0S242SV3000)	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ opcional) Resolução: 0,025/500 mm Repetibilidade (sensor): $\pm 0,050/500$ mm <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 3$ mm/30 m
	Digital MEMS Inclinometer System (0S242HV3000)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ ( $\pm 90^\circ$ opcional) Resolução: 0,025/500 mm Repetibilidade (sensor): $\pm 0,075/500$ mm <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 4$ mm/30 m
Slope Indicator Company (SINCO)	Digitilt Classic (50302599)	Servoacelerómetro clássico (2.2.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ calibrada ( $\pm 53^\circ$ mensurável) <sup>iii</sup> Resolução: 0,01/500 mm <sup>iv</sup> Repetibilidade (sensor): $\pm 0,01\%$ FS <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 6$ mm/25 m
	Digitilt AT System (50330999)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ Resolução: 0,005/500 mm Repetibilidade (sensor): $\pm 0,003^\circ$ <sup>v</sup> Repetibilidade (sistema): até quatro vezes a repetibilidade do sensor.
Soil Instruments (SOIL)	Vertical Digital Inclinometer System (C17)	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ , $\pm 60^\circ$ ou $\pm 90^\circ$ <sup>v</sup> Resolução: 0,01/500 mm <sup>iv</sup> Repetibilidade (sensor): $\pm 0,02\%$ FS <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 2$ mm/25 m ( $\pm 30^\circ$ ), $\pm 3$ mm/25 m ( $\pm 60^\circ$ ) e $\pm 4$ mm/25 m ( $\pm 90^\circ$ )
	Digital Inclinometer Pro (C17 Pro)		Amplitude: $\pm 30^\circ$ Resolução: 0,005/500 mm <sup>iv</sup> Repetibilidade (sensor): $\pm 0,02\%$ FS <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 2$ mm/25 m
RST Instruments	MEMS Digital Inclinometer System	MEMS capacitivo (2.2.5.4)	Amplitude: $\pm 30^\circ$ calibrada ( $\pm 38^\circ$ mensurável, $\pm 55^\circ$ opcional) Resolução: 0,005/500 mm Repetibilidade (sensor): $\pm 0,003^\circ$ <sup>ii</sup> Repetibilidade (sistema): $\pm 2$ mm/25 m

NOTA: todos os instrumentos referidos são portáteis (2.4.3) com plano de referência vertical (2.3) e passo de leitura de 0,5 m.

NOTA: os valores de repetibilidade referem-se sempre a cada medição (in ex.: média de duas leituras, 5.1).

NOTA: a resolução refere-se normalmente ao menor valor mensurável por leitura, mas há variações na forma como este valor é especificado (ver nota <sup>iii</sup>).

<sup>i</sup>Válido para amplitude  $\pm 5^\circ$  e dependente a unidade de aquisição.

<sup>ii</sup>Válido para inclinação compreendida no intervalo  $\pm 3^\circ$ .

<sup>iii</sup>A resolução especificada refere-se a cada medição e não a cada leitura. Logo, a resolução por leitura será de 0,02/500 mm.

<sup>iv</sup>Full-scale (ver Anexo II).

<sup>v</sup>Refere-se provavelmente à resolução da medição e não da leitura (ver nota <sup>iii</sup>).

<sup>vi</sup>A SINCO é omissa relativamente à repetibilidade do sistema nas especificações técnicas deste modelo. No entanto, o respetivo manual refere que o critério de estabilização de leitura deve ser ajustado até quatro vezes o valor de origem em caso de dificuldade.

Importa entender que o erro aleatório típico (in ex.: repetibilidade do sensor) refere-se apenas à direção *A*, uma vez que a direção *B* incorpora um erro adicional devido à folga lateral entre as ro-

das da sonda e as calhas de rotação do tubo inclinométrico. Apesar desta componente constituir um erro sistemático em cada medição, o comportamento global pode descrever-se através duma variável aleatória. De um modo geral considera-se que a dispersão característica na direção  $B$  ( $\varepsilon_a^B$ ) tem o dobro do valor homólogo na direção  $A$  ( $\varepsilon_a^A$ ) (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000). Contudo, é possível estimar  $\varepsilon_a^B$  se o valor da folga lateral ( $u_f$ ) for conhecido<sup>1,2,3</sup> (Coimbra, 2011):

$$\varepsilon_a^B = \pm \frac{t}{\sqrt{2}} \sqrt{(\varepsilon_a^A/\sqrt{2})^2 + (u_f/\sqrt{2})^2}; t = 2 \quad (77)$$

sendo  $t$  o coeficiente de expansão da dispersão de valores que caracterizam  $\varepsilon_a^B$ .

Para sondas clássicas da Slope Indicator Company (DGSI, 2013c), Mikkelsen (2003) refere uma tolerância lateral de  $0,76 \text{ mm}$  (in ex.:  $\pm 0,38 \text{ mm}$ ), independentemente do tipo de tubo. Contudo, Marte & Semprich (1998) demonstram que a componente aleatória daí resultante depende diretamente do tipo de tubo (in ex.: formato das calhas), do modelo de sonda (in ex.: formato das rodas) e da inclinação do tubo (in ex.: paralelismo das calhas e orientação da inclinação relativamente às direções  $A$  e  $B$ ), concluindo que o erro aleatório na direção  $B$  tem magnitude 2 a 3 vezes superior ao valor homólogo da direção  $A$ . Na mesma publicação observa-se também que a influência da combinação geométrica *roda + calha* é desprezável em instalações aproximadamente verticais (in ex.:  $3 - 5^\circ$ ). Portanto, considera-se adequada a prática comum (in ex.:  $\varepsilon_a^B = 2\varepsilon_a^A$ ) ou a estimativa de  $\varepsilon_a^B$  através da equação (77).

### 6.2.2. Erro típico do sistema no cálculo de deslocamentos com múltiplas referências

É comum considerar-se o erro típico do sistema publicado pelo fabricante nas curvas de deslocamento e desprezarem-se oscilações dentro daquele intervalo. Esta prática despreza o erro contido na campanha de referência, uma vez que esta constitui o padrão de comparação. No entanto, a presença de várias campanhas de referência (5.6) obriga a consideração dos erros afetos às curvas de deslocamento anteriores a cada referência extraordinária.

Considerando-se a introdução do erro no cálculo dos desvios ((75), (76), 6.2.1), o erro típico das curvas de deslocamentos incrementais e acumulados duma campanha ordinária com  $k$  campanhas de referência corresponde às equações (78) e (79), respetivamente<sup>4</sup>.

$$\Delta d_{p,i} = L\Delta m_i \pm \sqrt{k}\varepsilon_a + k\varepsilon_s \quad (78)$$

$$\Delta D_{p,j} = L\sum_i^j \Delta m_i \pm \sqrt{kn}\varepsilon_a + kn\varepsilon_s; n = j - i + 1 \quad (79)$$

<sup>1</sup>  $t = 2$  corresponde a uma cobertura de 95% da gama de valores de uma distribuição estatística gaussiana (JCGM, 2008b).

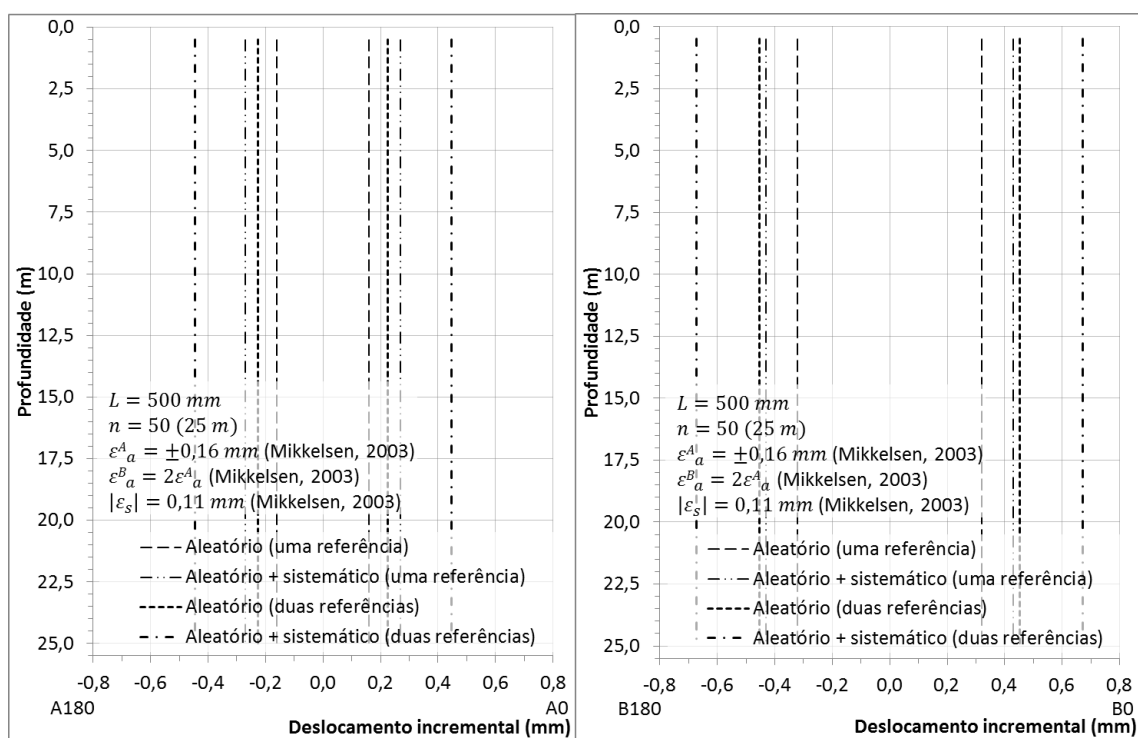
<sup>2</sup> Coimbra (2011) atribui uma distribuição em  $U$  (in ex.: arco-seno) à probabilidade de ocorrência de  $\pm u_f$ .

<sup>3</sup>  $\varepsilon_a^A/\sqrt{2}$  considera uma distribuição normal dos valores de  $\pm \varepsilon_a^A$  com um coeficiente de expansão  $t = 2$  ((81), (82), 6.3.1).

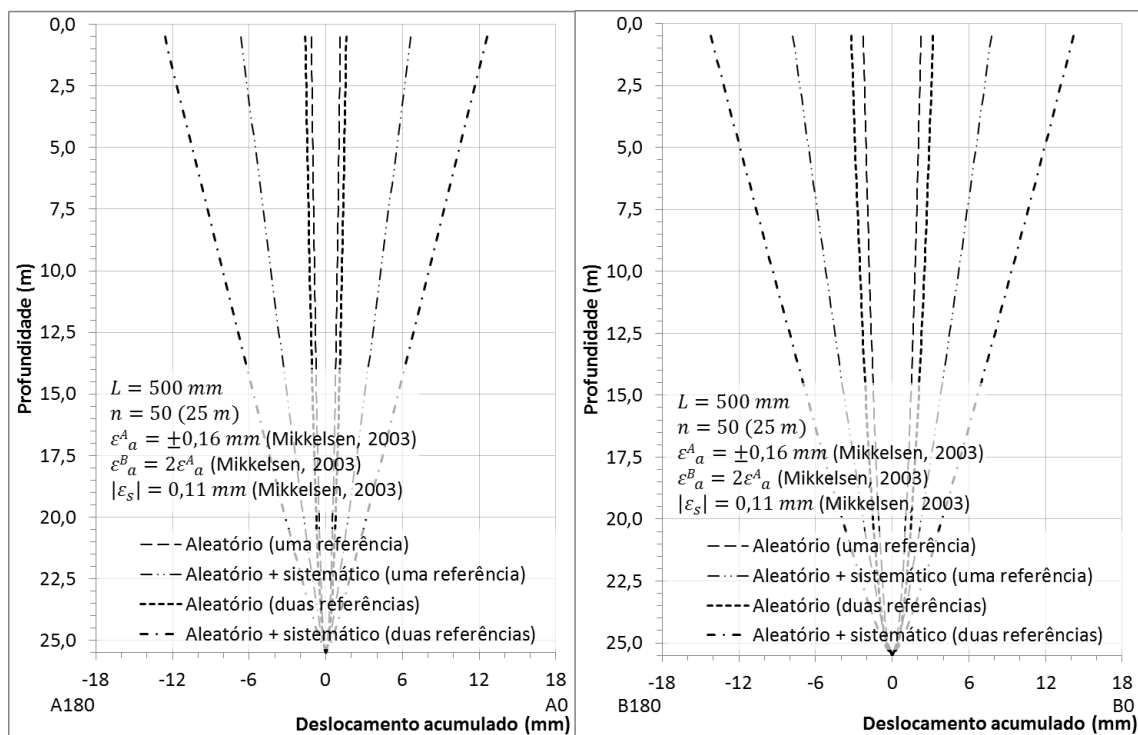
<sup>4</sup> Note-se que a expressão (79) é genérica e pressupõe a ocorrência de  $\varepsilon_s$  em todas as medições (Anexo XII).



Na Figura 72 apresentam-se exemplos dos limites de confiança correspondentes ao erro típico de deslocamentos que integrem uma ou duas campanhas de referência.



a) Deslocamentos incrementais.



b) Deslocamentos acumulados.

Figura 72 – Erro típico de um sistema inclinométrico no cálculo de deslocamentos nas direções *A* e *B* com contribuição de uma ou de duas campanhas de referência.

Estas figuras demonstram, novamente (6.2.1), a importância que os erros sistemáticos assumem no cálculo de deslocamentos. Em geral, pode-se considerar que deslocamentos dentro do intervalo correspondente ao erro aleatório não são significativos. No que respeita a este intervalo, a introdução de novas referências tem pouco significado, mas, na presença de erros sistemáticos em ambas as campanhas, o aumento da incerteza é muito significativo.

### 6.3. Indicadores qualitativos das medições inclinométricas

#### 6.3.1. Somas das leituras inclinométricas

As somas das leituras são os elementos-base da análise qualitativa dos dados inclinométricos. Apesar da tendência crescente para a aquisição e apresentação de dados em unidades métricas ou imperiais, a análise de dados<sup>1</sup> inclinométricos faz-se preferencialmente em unidades de medição (*un*) e será assim considerada e apresentada neste documento. A conversão pode fazer-se através da resolução especificada pelo respetivo fabricante (Quadro 20, 6.2.1; 6.3.3; Anexo II).

Introduzindo-se a ocorrência de erros aleatórios ( $\varepsilon'_a$ ) e sistemáticos ( $\varepsilon'_s$ ) em cada leitura inclinométrica, as equações (11) e (12) (5.1) podem reescrever-se na forma (Coimbra, 2011):

$$\begin{cases} l_i^0 = k \sin \delta_i^0 + b \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,i} \\ l_i^{180} = k \sin \delta_i^{180} + b \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,i} \end{cases}; \delta = \theta \vee \delta = \beta \quad (80)$$

Considerando-se as especificações técnicas dos inclinómetros como uma contribuição do tipo B (4.7.3.1) para a estimativa do erro, ou incerteza, de uma medição (Dobbert, 2010; JCGM, 2008b), as equações (13) e (14) (5.1) podem reescrever-se na forma (Coimbra, 2011):

$$m_i = \frac{l_i^0 - l_i^{180}}{2k} = \sin \delta_i \pm t \frac{s}{\sqrt{2}} + \varepsilon_{s,i}; t \frac{s}{\sqrt{2}} = \varepsilon_a; \varepsilon_{s,i} = \frac{\varepsilon'_{s,i} + \varepsilon'_{s,i}^{180}}{2}; \delta = \theta \vee \delta = \beta \quad (81)$$

sendo  $t$  o coeficiente de expansão de uma distribuição gaussiana com dispersão característica  $s$ .

Sabendo-se que o coeficiente de expansão comumente utilizado corresponde a cerca de 95% da probabilidade de ocorrência dos valores caracterizados pela dispersão  $s$  ( $t = 2$ ; Dobbert, 2010; JCGM, 2008b),  $\varepsilon'_a$ ,  $\varepsilon_a$ ,  $\varepsilon'_s$  e  $\varepsilon_s$  relacionam-se da seguinte forma (Coimbra, 2011):

$$\begin{cases} \varepsilon_a = 2 \varepsilon'_a / \sqrt{2} \\ \varepsilon_s = 2 \varepsilon'_s / 2 \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon'_a = \varepsilon_a / \sqrt{2} \\ \varepsilon'_s = \varepsilon_s \end{cases}; \varepsilon'_s = \frac{\varepsilon'_{s,i} + \varepsilon'_{s,i}^{180}}{2} \quad (82)$$

As somas das leituras inclinométricas ( $S_i$ ) correspondem à soma dos valores simétricos obtidos para cada direção em determinada profundidade:

$$\begin{cases} S_i^A = l_i^{A0} + l_i^{A180} \\ S_i^B = l_i^{B0} + l_i^{B180} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} S_i^A = 2b_A \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,i} + \varepsilon'_{s,i}^{A180} \\ S_i^B = 2b_B \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,i} + \varepsilon'_{s,i}^{B180} \end{cases} \quad (83)$$

<sup>1</sup> O termo “dados” refere-se aos valores diretamente obtidos do equipamento (in ex.:  $k \sin \theta$ ) e o termo “resultados” refere-se à produção de perfis ou de evoluções de deslocamentos ao longo do tempo, destinados à interpretação geotécnica.

Considerando a relação entre os erros de leitura e de medição exposta na equação (82), a expressão (83) pode reescrever-se na seguinte forma:

$$\begin{cases} S_i^A = 2b_A \pm \varepsilon_a^A + 2\varepsilon_{s,i}^A \\ S_i^B = 2b_B \pm \varepsilon_a^B + 2\varepsilon_{s,i}^B \end{cases} \quad (84)$$

Ou seja, as somas das leituras inclinométricas exprimem o erro típico do sistema em torno do dobro do desvio na origem. Como se depreende, somas que se situem fora do intervalo  $2b \pm \varepsilon_a$  incorporam erros sistemáticos. Portanto, a análise estatística destes valores permite a deteção de erros sistemáticos e a sua potencial correção.

### 6.3.2. Média das somas das leituras inclinométricas

A média das somas das leituras inclinométricas ( $\mu$ ) exprime-se pela expressão (85) e corresponde aproximadamente ao dobro do desvio na origem ( $2b$ ). Este valor pode sofrer alterações em função das condições específicas de cada instalação, ou da ocorrência de erros, mas em condições normais de operação exhibe tendência constante ao longo do tempo. Por esta razão,  $\mu$  é um bom indicador da condição metrológica dos instrumentos e deve utilizar-se para rastrear a evolução do desvio na origem de cada inclinómetro.

$$\mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n S_i \cong 2b \quad (85)$$

Na Figura 73 apresenta-se a evolução do valor de  $\mu$  ao longo do tempo para os dois sensores de um inclinómetro clássico da Slope Indicator Company (DGSI, 2013c). A alteração gradual da média que se verifica é normal e denomina-se por deriva do desvio na origem.

Na mesma figura observam-se limites de confiança de  $\pm 50 \text{ un}$  e  $\pm 100 \text{ un}$  (in ex.:  $b$  no intervalo  $\pm 25 \text{ un}$  a  $\pm 50 \text{ un}$ , respetivamente; SINCO, 1993; SISGEO, 2013a). Estes limites não são fáceis de definir e a maioria dos fabricantes não indica qualquer valor de referência. Contudo, é boa prática acompanhar a evolução de  $\mu$ , uma vez que permite estimar a deriva do desvio na origem dos sensores e detetar alterações mecânicas (in ex.: devido à ocorrência de acidentes e/ou avarias). Na ausência de valores limite de referência, deve proceder-se ao rastreamento de  $\mu$  ao longo do tempo concorrentemente com a execução de verificações periódicas do desempenho metrológico dos dispositivos (4.7.2).

Na Figura 74 apresenta-se outro exemplo de evolução do valor de  $\mu$  ao longo do tempo. Neste caso observa-se uma deriva normal na direção  $A$ , mas, em determinado momento, verifica-se uma alteração brusca do desvio na origem do sensor da direção  $B$ . Constata-se que o respetivo inclinómetro se manteve em funcionamento, nestas condições, durante um período superior a 10 anos. Normalmente, a direção  $B$  não produz deslocamentos significativos, o que dificulta a dete-

ção deste tipo de ocorrências. No entanto, se tivessem sido aplicados procedimentos de validação qualitativa das campanhas inclinométricas durante aquele período, esta situação poderia ter sido imediatamente detetada e as respetivas consequências devidamente avaliadas.

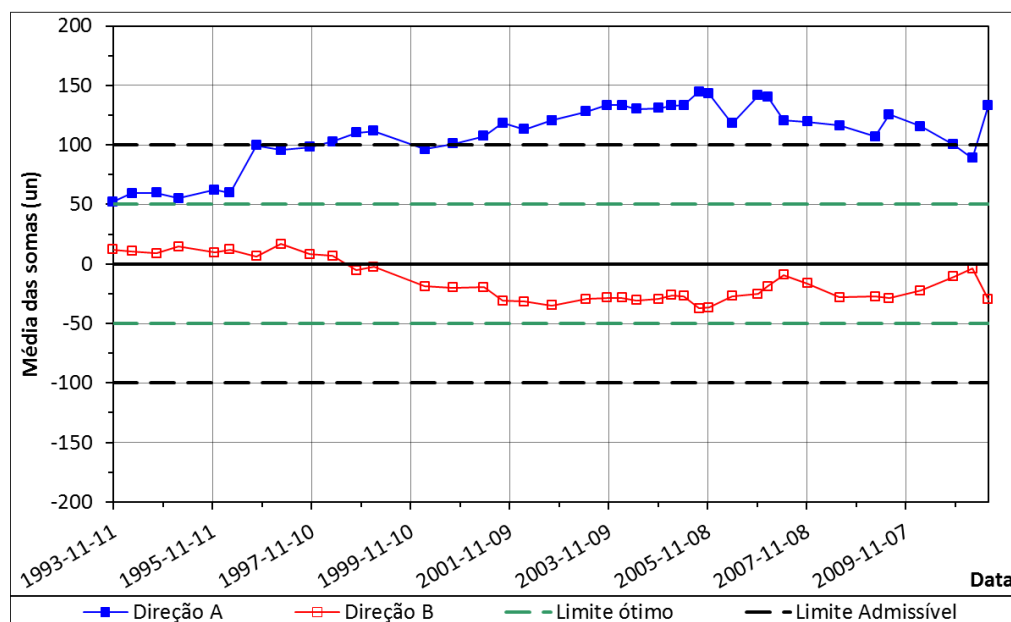


Figura 73 – Evolução da média das somas das leituras com deriva normal do desvio na origem.

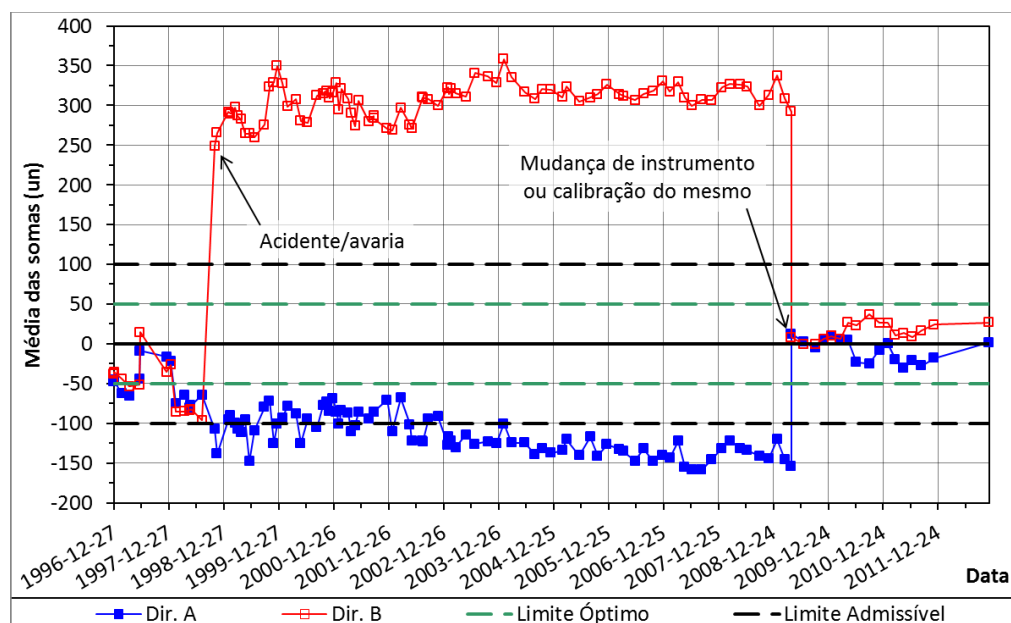


Figura 74 – Evolução da média das somas das leituras com deriva anormal do desvio na origem do sensor B.

O efeito da deriva do desvio na origem em medições inclinométricas não é claro. Coimbra (2011) refere que valores muito elevados de desvio podem resultar na correção deficiente do mesmo, pelo processo de cálculo ((13), (14), 5.1), devido ao facto do sinal de resposta dos sensores não ser linear (Figura 75). No entanto, o autor não quantifica valores limite de desvio na origem a partir dos quais se verifique aquele fenómeno. GEOKON (2009b) também refere a não linearidade do

signal de resposta como uma fonte de erro quando o desvio na origem é elevado. A empresa refere que o erro introduzido na leitura de uma inclinação  $\theta$  é proporcional a  $1/\cos \theta$ , desprezando valores de  $|b| \leq k/10$ <sup>1</sup>. No entanto, há fatores que não são, ou são erroneamente, considerados:

- O acompanhamento inclinométrico baseia-se essencialmente na precisão das medições, não na exatidão. Neste contexto, importa considerar a deriva do desvio ocorrida entre uma campanha de referência e outra ordinária e não o valor absoluto desse desvio em determinado momento.
- Visto que uma medição inclinométrica resulta da média da diferença entre duas leituras simétricas, o erro de exatidão introduzido, neste contexto, também resulta da diferença média dos erros de cada leitura. Desta forma, aquele limite (in ex.:  $|b| \leq 2500$ ) poderia ser superior, uma vez que o erro de leitura no sentido contrário ao do desvio será menor.
- A admissão de valores de desvio daquela magnitude ignora a inclinação do tubo. Note-se que 2500 *un* equivalem a 5,74° para um instrumento com resolução 0,02 mm/*un* e  $L = 500$  mm. Se for considerado que a maioria dos tubos verticais são instalados com inclinações de 1 – 3°, o erro introduzido por um desvio daquela magnitude será seguramente superior e ultrapassará o erro típico do sistema.
- O erro típico de medição é essencialmente de natureza aleatória (in ex.: oscila entre os sinais positivo e negativo), uma vez que a ocorrência de erros sistemáticos pode evitar-se com procedimentos adequados de operação e de manutenção (4; quadros 18 e 19, 6.1). O erro que advém da deriva de  $|b|$  ao longo do tempo é de natureza puramente sistemática (in ex.: tem progressão linear em função do número de medições). Portanto, não é boa prática descurar esta influência, uma vez que, apesar de parecer pequeno, pode tornar-se incomportável em instalações profundas e/ou com inclinações apreciáveis.

O erro produzido pela deriva do desvio pode ser avaliado mediante a observação dos deslocamentos incrementais ocorridos na porção inferior das respetivas instalações inclinométricas (in ex.: zona sem movimentação expectável, 4.7.2). A experiência demonstra que aquele valor influencia os deslocamentos, mas, tratando-se de uma deriva efetiva e não de uma alteração do desvio na origem<sup>2</sup> (6.4.2), o erro associado mantém-se normalmente dentro do intervalo de valores admissíveis.

Coimbra (2011) sugere a aplicação de múltiplas referências para minimizar o efeito da deriva do desvio nos deslocamentos<sup>3</sup>. No entanto, esta prática tem certas particularidades a considerar:

---

<sup>1</sup> A empresa refere  $|b| = 2000$  para um instrumento com  $k = 20000$ , o que equivale a  $|b| = 2500$  para  $k = 25000$  ou  $|b| = k/10$ . Na verdade, o erro que resultará daquele tipo de sistema, naquelas condições, é de 0,25 mm (in ex.:  $L(\sin 0,1/\cos 0,1 - \sin 0,1)$ ;  $L = 500$  mm;  $0,1 = k/10 : k$ ), sendo este o valor de erro típico publicado pelo fabricante (in ex.:  $\varepsilon_a = \pm 0,15$  mm;  $\varepsilon_s \leq \pm 0,10$  mm).

<sup>2</sup> Neste contexto, a deriva do desvio não afeta a sensibilidade do instrumento em dois sentidos opostos (in ex.: o cálculo de uma determinada variação angular com base em valores de leitura produzirá aproximadamente o mesmo valor absoluto, independentemente do sentido a que pertençam essas leituras). A alteração de desvio (6.4.2) é um erro sistemático documentado que tem origem numa alteração de sensibilidade entre cada par de leituras simétricas.

<sup>3</sup> A primeira campanha correspondente ao desvio na origem anómalo constitui uma referência para as campanhas seguintes.

- os deslocamentos calculados em campanhas posteriores à nova referência são afetados pela qualidade desta, pelo que é necessário verificar a sua fiabilidade;
- a evolução dos deslocamentos ocorridos entre as campanhas anterior e posterior à nova referência é perdida<sup>1</sup>.

As limitações acima descritas podem ser contornadas mediante a execução de campanhas de referência extraordinárias, logo que este fenómeno seja detetado, sendo para tal necessário que existam rotinas de verificação qualitativa dos dados inclinométricos. Contudo, há casos em que a realização de campanhas extraordinárias não é exequível (in ex.: por motivos de agenda ou de orçamentação). Nestas situações, sugere-se a análise dos deslocamentos incrementais em zonas do tubo consideradas geotecnicamente estáveis, juntamente com a execução de medições de verificação inclinométrica (4.7.2), a fim de determinar a necessidade de proceder à execução de campanhas de referência extraordinárias. Os procedimentos de análise de leituras apresentados em 6.4.2 e em 6.4.7 podem também aplicar-se.

No Anexo III apresenta-se o resultado de alguns ensaios executados na tentativa de clarificar a influência da magnitude do desvio na origem no cálculo de deslocamentos/desvios. Verifica-se que, em termos de exatidão, as inclinações medidas não são significativamente afetadas para valores de  $|b|$  até cerca de 150 *un*. Contudo, fica demonstrado<sup>2</sup> que a deriva do desvio pode introduzir alterações ao nível da sensibilidade.

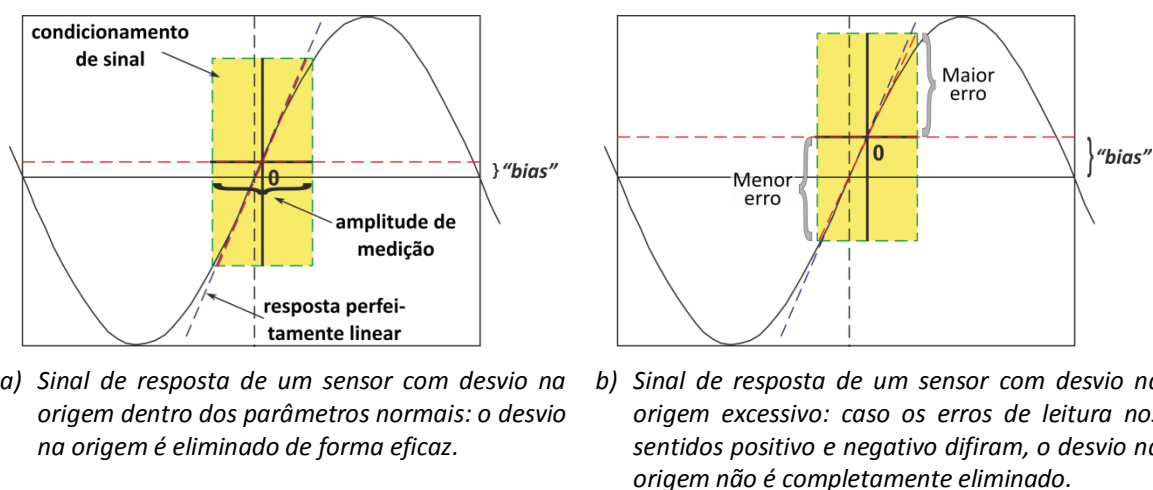


Figura 75 – Esquematização da influência da deriva do desvio na origem na medição de inclinações (adaptado de Coimbra, 2011).

<sup>1</sup> Ou seja, a conversão duma campanha ordinária numa referência implica que os deslocamentos entre esta e a referência anterior sejam eliminados do histórico. Nesta medida, esta metodologia pode não ser aceitável quando se verifica uma evolução significativa na campanha converter. Uma forma de contornar esta situação é constituir uma versão corrigida da campanha a converter para fazer a transição entre referências.

<sup>2</sup> Note-se que as condições em que essas alterações poderão ocorrer permanecem indefinidas, uma vez que o estudo não contempla a influência da deriva do desvio em determinado instrumento, concentrando-se apenas na comparação de medições obtidas a partir de instrumentos diferentes com valores distintos de desvio na origem.

### 6.3.3. Dispersão das somas das leituras inclinométricas

A dispersão das somas das leituras inclinométricas exprime-se pelo respetivo desvio padrão ( $s$ ), de acordo com a expressão (86). Este valor reflete a variabilidade das discrepâncias angulares de cada par de leituras em torno do dobro do desvio na origem ((83), (84), 6.3.1; (85), 6.3.2).

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \mu)^2}{n-1}} \quad (86)$$

A dispersão  $s$  constitui o principal indicador de qualidade dos dados inclinométricos, visto que desvios importantes das  $S_i$ , relativamente a  $\mu$ , têm tradução direta no cálculo de deslocamentos.

A análise deste indicador faz-se de forma semelhante à análise de  $\mu$  (6.3.2). Os limites de confiança atribuídos correspondem ao erro aleatório típico do sistema (Quadro 20, 6.2.1). Na Figura 76 apresenta-se a evolução de  $s$  para a mesma instalação e durante o mesmo período do exemplo exposto na Figura 74 (6.3.2). Neste caso, tratando-se de uma sonda clássica DGSI (2013c), os limites de confiança fixam-se em  $\pm 10 \text{ un}$  e  $\pm 20 \text{ un}$  para as direções  $A$  e  $B$ , respetivamente (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000, 1993). Perante a eventual falta de informação por parte do fabricante, estes limites de confiança podem estimar-se da seguinte forma (Coimbra, 2011; Anexo II):

1. Especificações técnicas (DGSI, 2013c):
  - Passo de leitura:  $L = 500 \text{ mm}$ ;
  - Resolução<sup>1</sup>:  $0,02 \text{ mm/un}$ ;
  - Repetibilidade do sistema:  $|\varepsilon_a^A| + |\varepsilon_s| = 6 \text{ mm}/25 \text{ m}$ ;
  - Erro aleatório do sistema:  $\varepsilon_a^A = \pm 1,4 \text{ mm}/25 \text{ m}$ .
2. Cálculo do erro típico do sistema ((76); 6.2.1):
  - $$\begin{cases} \sqrt{50}\varepsilon_a^A + 50\varepsilon_s = 6 \text{ mm} \\ \sqrt{50}\varepsilon_a^A = 1,4 \text{ mm} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \varepsilon_s \cong \pm 0,12 \text{ mm} \\ \varepsilon_a^A \cong \pm 0,20 \text{ mm} \end{cases}$$
3. Conversão de unidades:
  - $$\begin{cases} \varepsilon_a^A = \pm 0,20/0,02 = \pm 10 \text{ un} \\ \varepsilon_s = \pm 0,12/0,02 = \pm 6 \text{ un} \end{cases}$$
  - $\varepsilon_a^B \cong \pm 2\varepsilon_a^A = \pm 20 \text{ un}$ ; ou
  - $$\varepsilon_a^B = \pm \sqrt{2 \left[ (\varepsilon_a^A/\sqrt{2})^2 + (u_f/\sqrt{2})^2 \right]} \cong 22 \text{ un}; u_f = \pm 0,38 \text{ mm} ((77); 4.10.1)$$

Na Figura 76 encontram-se assinaladas algumas campanhas inclinométricas com valores de  $s$  elevados e/ou excessivos. Nestas situações deve proceder-se à análise das somas das leituras em profundidade, a fim de detetar a presença de erros sistemáticos (6.4.1).

Na Figura 77 apresentam-se os deslocamentos acumulados das campanhas assinaladas na Figura 76. O sufixo “R” determina uma campanha repetida devido a resultados questionáveis.

---

<sup>1</sup> Ver nota *iii* do Quadro 20 (6.1).

Na Figura 78 apresentam-se os perfis das somas das leituras correspondentes às campanhas 45, 45R e 51, expostas na Figura 77. As campanhas 49 e 49R são analisadas na secção 6.4.2.

Nas figuras 77 e 78 verifica-se correspondência entre a ocorrência de desvios excessivos das somas  $S_i$  e de deslocamentos acumulados. De facto, a análise das somas das leituras em profundidade permite detetar a presença de erros sistemáticos, fornecendo elementos de apoio à decisão sobre a ocorrência de curvas de deslocamento duvidosas e respetiva correção. Este processo elimina a subjetividade da análise qualitativa das medições inclinométricas e permite evitar a execução desnecessária de campanhas extraordinárias. Por esta razão, a deteção e correção de erros sistemáticos deve fazer-se com base na análise das somas das leituras (6.4).

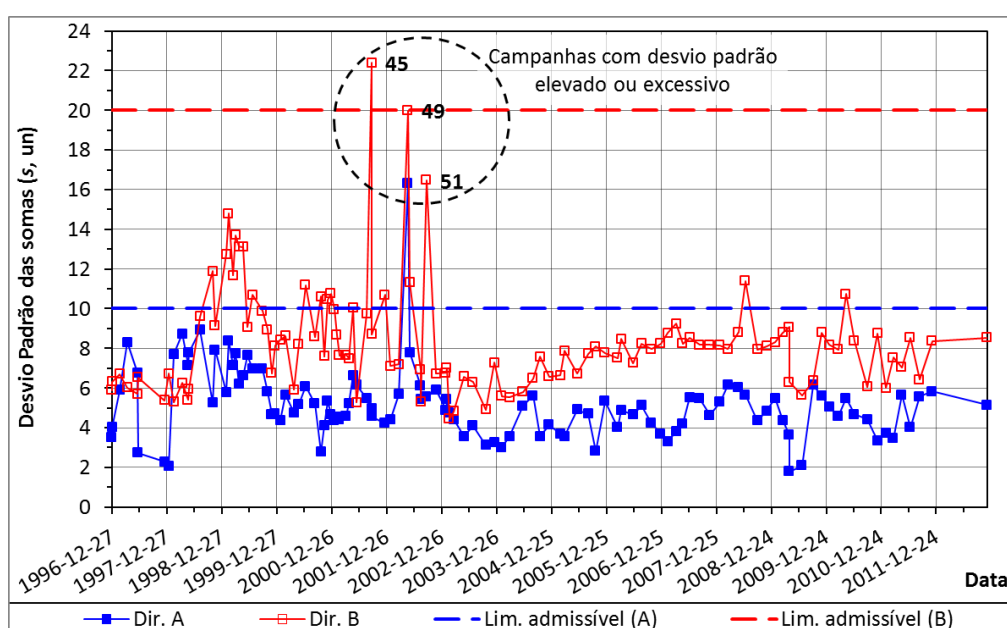


Figura 76 – Evolução do desvio padrão das somas das leituras ao longo do tempo.

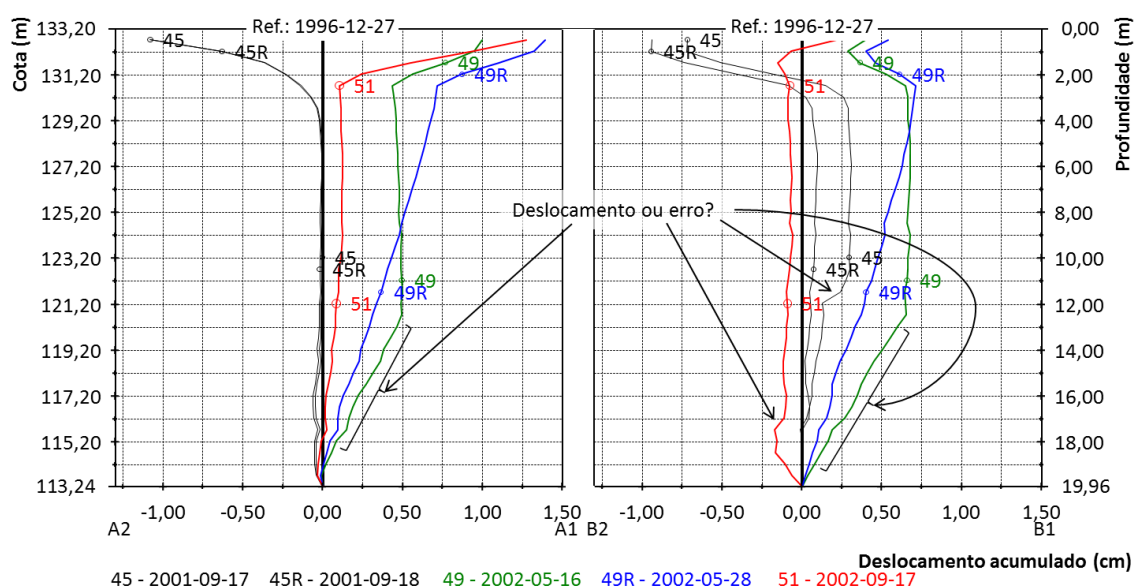
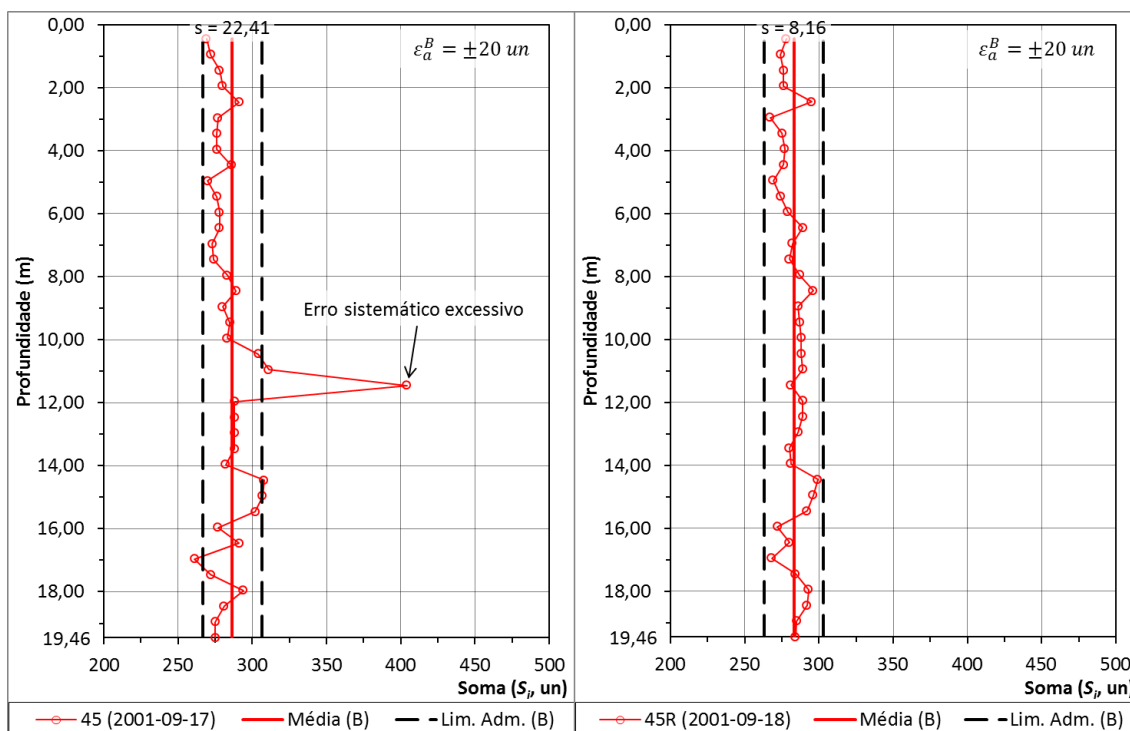


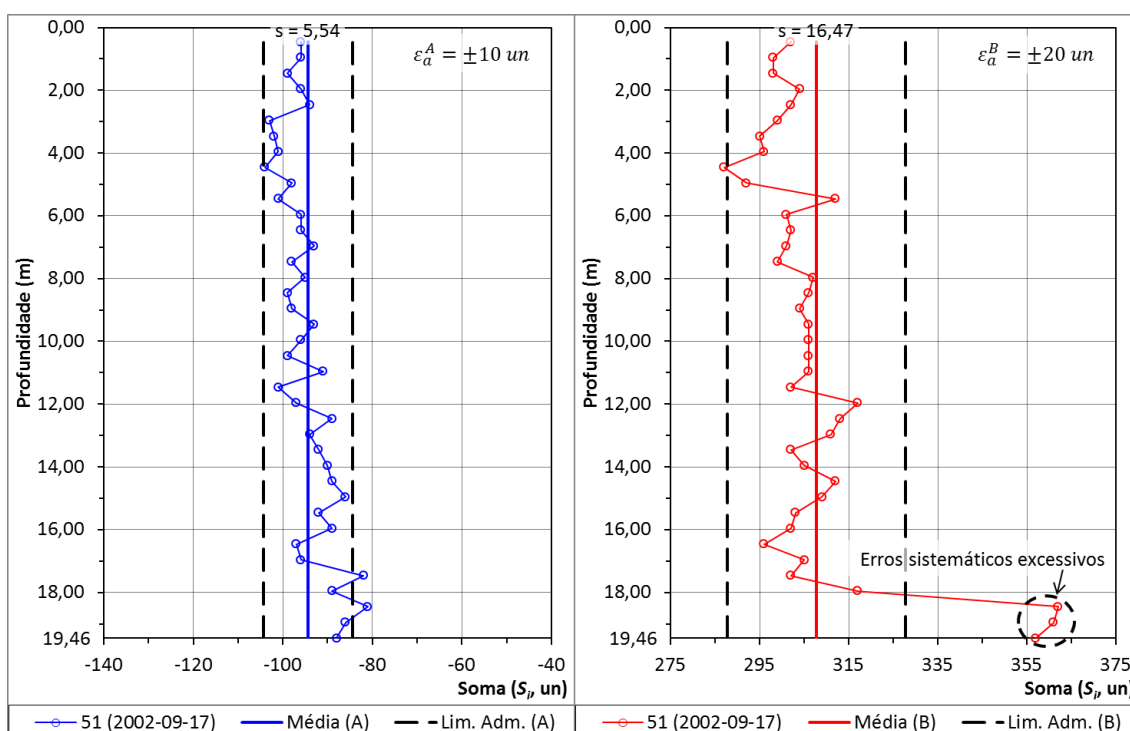
Figura 77 – Deslocamentos acumulados de algumas campanhas com valores elevados de desvio padrão.





a) Somas da campanha 45 na direção B.

b) Somas da campanha 45R na direção B.



c) Somas da campanha 51 na direção A.

d) Somas da campanha 51 na direção B.

Figura 78 – Análise das somas das leituras em profundidade.

Nem sempre é possível cumprir os limites de confiança desejáveis, seja devido a deformações localizadas que afetem o correto posicionamento das rodas da sonda em determinadas secções

(Figura 92, 6.4.7), seja por deficiências da instalação<sup>1</sup>. Por esta razão, é comum considerar-se o desvio padrão das somas da campanha de referência como um valor característico da instalação, procedendo-se à análise qualitativa das campanhas ordinárias com base num diferencial de dispersão (Coimbra, 2011; DGSI, 2007; SINCO, 1993). Este diferencial de dispersão ( $\Delta s$ ) corresponde à diferença entre os desvios padrão das somas das leituras de determinada campanha ordinária ( $s_p$ ) e da respetiva campanha de referência ( $s_r$ ):

$$\Delta s = s_p - s_r \quad (87)$$

A recomendação generalizada é a validação de campanhas ordinárias que exibam valores de  $\Delta s$  dentro do intervalo  $\pm 3 - 5$  un (DGSI, 2007; SINCO, 1993). No entanto, Coimbra (2011) observa que a variabilidade de  $s$  depende do número de medições (in ex.: profundidade da instalação), podendo haver maior flexibilidade em instalações mais curtas, de forma a evitar, nestas situações, a ocorrência de um número elevado de invalidações não justificadas. O mesmo autor sugere a aplicação do teste de Fisher<sup>2</sup> para avaliação da homogeneidade de duas variâncias (*F-test*). O *F-test* baseia-se no cálculo de um parâmetro estatístico  $F$  que resulta da proporção positiva entre duas variâncias:

$$F = s_1^2 / s_2^2; s_1^2 \geq s_2^2 \quad (88)$$

Este parâmetro é depois comparado com o valor homólogo da distribuição  $F$  com os graus de liberdade correspondentes (in ex.:  $n - 1$ ) e ao nível probabilístico requerido (in ex.:  $F_{0,05}$  para 95% de cobertura). A hipótese colocada é a similitude/homogeneidade das variâncias/dispersões das somas de ambas as campanhas (JCGM, 2008b; Snedecor, 1946; van Reeuwijk & Houba, 1998). Se  $F_{0,05} \geq F$  a hipótese é validada e a campanha  $p$  é considerada conforme.

O *F-test* pode-se aplicar de duas formas distintas (Snedecor, 1946; van Reeuwijk & Houba, 1998):

- a) Variante bicaudal: ambas as caudas da distribuição  $F$  são testadas. Esta variante utiliza-se para determinar se duas dispersões de uma distribuição normal podem ser consideradas semelhantes (in ex.: pertencentes à mesma população).
- b) Variante unicaudal: apenas uma cauda da distribuição  $F$  é testada. Esta variante utiliza-se para determinar se a dispersão de uma distribuição normal é significativamente superior ou inferior a outra.

Neste caso importa saber se  $s_p \gg s_r$ , uma vez que a ocorrência de uma dispersão inferior à da referência não introduzirá erros sistemáticos adicionais. Por esta razão, Coimbra (2011) aplica a va-

<sup>1</sup> Por exemplo, uniões fixas mal instaladas, estacionamento da sonda em zonas de transição de uniões telescópicas, existência de detritos, corrosão ou constricção por pressão excessiva ou por acomodamento do tubo durante a cura do bolbo de selagem.

<sup>2</sup> Sir Ronald Aylmer Fisher (1890-1962): formado em astronomia (1912). Conhecido como um dos fundadores da estatística moderna, foi pioneiro na aplicação de métodos estatísticos para concetualização experimental. Desenvolveu metodologias de amostragem e de análise (in ex.: análise multivariada) que são hoje aplicadas em praticamente todas as áreas científicas (EBO, 2018).

riante *b*), referindo também que a análise de  $\Delta s$ , e, por consequência, a aplicação deste teste, só tem significado quando  $s_p > s_r \wedge s_p > \varepsilon_a$ . Pois, na pior das hipóteses, campanhas com  $s_p \leq \varepsilon_a$  terão erro equivalente ao especificado pelo fabricante e campanhas com  $s_p \leq s_r$  terão erro equivalente ao da respetiva referência<sup>1</sup>.

Sabendo-se que as campanhas inclinométricas em determinada instalação têm sempre o mesmo número de medições<sup>2</sup>, é possível definir limites de confiança para  $\Delta s$  em função de  $s_r$  e de  $F_{0,05}(df_1; df_2)$  (Coimbra, 2011):

$$\begin{cases} F_{0,05}(df_1; df_2) \geq s_p^2/s_r^2; s_p \geq s_r \Rightarrow \begin{cases} s_p \leq s_r \sqrt{F_{0,05}(df_1; df_2)} \\ |\Delta s| \leq s_r \left[ \sqrt{F_{0,05}(df_1; df_2)} - 1 \right] \end{cases} \end{cases} \quad (89)$$

com  $df_1 = df_2 = n - 1$ .

Coimbra (2011) nota que, para os valores especificados em DGSi (2007) e SINCO (1993) (in ex.: profundidade de 25 m,  $s_r^A = 10$  e  $s_r^B = 20$ ), a aplicação da expressão (89) resulta em  $|\Delta s| \leq 2,69 \text{ un}$  e  $|\Delta s| \leq 5,38 \text{ un}$  para direções *A* e *B*, respetivamente. Estes valores estão de acordo com as recomendações do fabricante.

Considerando-se uma sonda clássica DGSi (2013c), na figura seguinte apresenta-se um ábaco que permite estimar o valor de  $|\Delta s|$  em função da profundidade da instalação e do valor de  $s_r$ .

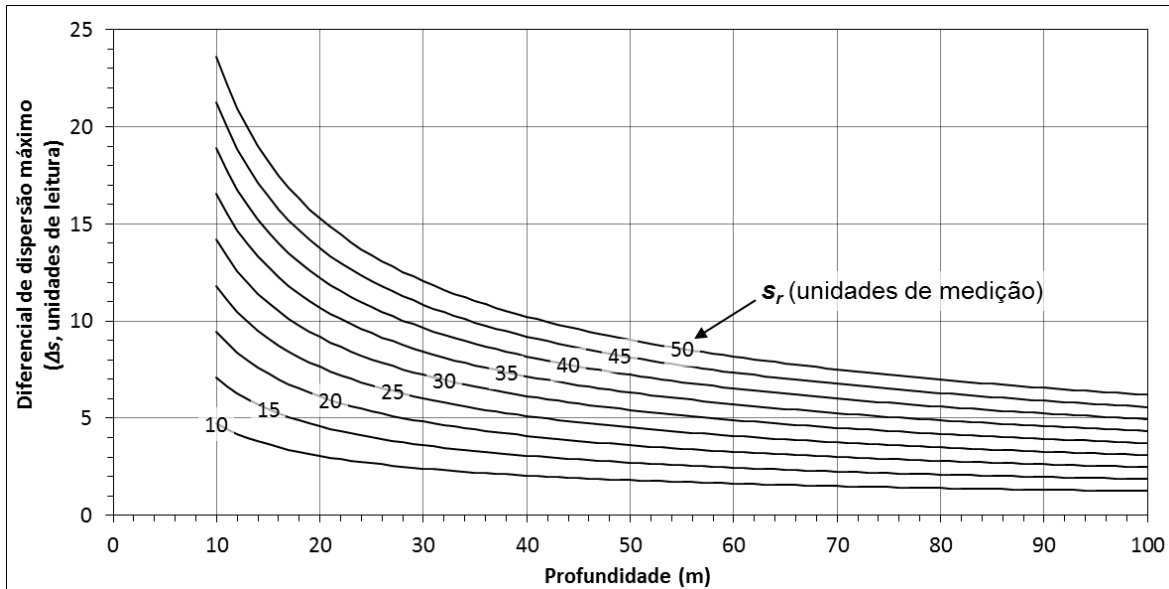


Figura 79 – Ábaco para determinação do valor máximo do diferencial de dispersão ( $\Delta s$ ) para uma sonda com resolução 0,02 mm/un e  $k = 25000$  (adaptado de Coimbra, 2011).

<sup>1</sup> Há instalações onde não é possível atingir os parâmetros de qualidade desejáveis. No entanto, interessa sempre manter os padrões de qualidade caracterizados pela campanha de referência.

<sup>2</sup> Com exceção de alguns casos particulares, como a instalação faseada de tubos inclinométricos durante a construção de um aterro.

## 6.4. Detecção e correção de erros sistemáticos

### 6.4.1. Generalidades

Existem dois tipos de erro sistemático passíveis de ocorrer nos dados inclinométricos:

- a) Generalizado: ocorre num conjunto ou na totalidade das leituras/medições. Introduce alterações de carácter incremental no processo de cálculo.
- b) Pontual: ocorre em leituras isoladas. Introduce alterações de carácter constante no processo de cálculo.

Encontram-se documentados vários erros do tipo *a)*, os quais se apresentam nas secções 6.4.2 a 6.4.6 (in ex.: Coimbra, 2011; Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000). Alterações deste tipo caracterizam-se pela introdução de um deslocamento, constante ou não, que é integrado em cada profundidade (in ex.: propaga-se linearmente em função do número de medições). Por um lado, este tipo de erro é especialmente gravoso porque adquire valores elevados com muita frequência. Por outro lado e pela mesma razão, é fácil de detetar.

Alterações do tipo *b)* caracterizam-se pela introdução de um deslocamento que é integrado entre duas secções (in ex.: uma constante replicada ao longo da instalação, sem progressão). Este tipo de erro é facilmente detetado através da análise das somas das leituras em profundidade, mas só se justifica a sua correção quando se traduz num desvio padrão exagerado e/ou em deslocamentos questionáveis. Não se conhecem métodos de análise e correção para este tipo de erro. Na secção 6.4.7 apresentam-se algumas técnicas de mitigação desenvolvidas pelo autor deste documento no Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC).

### 6.4.2. Erro de alteração do desvio na origem (*bias-shift error*)

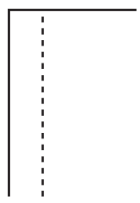
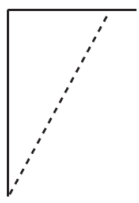
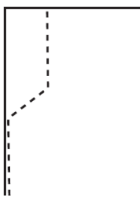
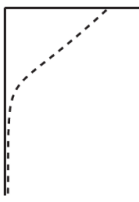

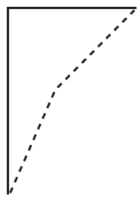
Este tipo de erro deve-se a uma alteração do desvio na origem durante a execução de uma campanha inclinométrica e traduz-se na introdução de um deslocamento incremental constante ao longo do tubo (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000). A causa desta ocorrência pode relacionar-se com o funcionamento erróneo do(s) sensor(es) ou com uma avaria. O *bias-shift error* é normalmente identificado pela análise dos perfis de deslocamentos incrementais e acumulados (5.3; Quadro 21). No entanto, será demonstrado que também é possível identificá-lo através da análise das somas das leituras em profundidade (Figura 78, 6.3.3).

É importante não confundir este tipo de erro (*bias-shift*) com a deriva do desvio na origem (*bias-drift*). Embora ambas as situações possam produzir padrões de deslocamento semelhantes, a primeira caracteriza-se por um acontecimento brusco e isolado, associado a uma campanha, numa ou em ambas as direcções, enquanto a segunda compreende uma evolução lenta, contínua e gra-

dual ao longo do tempo, que afeta sempre ambas as direções. Ademais, o *bias-shift* circunscreve-se a um período muito limitado (in ex.: uma campanha), enquanto o *bias-drift* não tem retorno.

No Quadro 21 ilustram-se os padrões de deslocamento tipicamente produzidos pela ocorrência de erros de alteração do desvio na origem.

Quadro 21 – Padrões de deslocamento típicos do erro de alteração do desvio na origem (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000).

Deslocamentos incrementais	Deslocamentos acumulados	Ocorrências e observações
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteração de desvio entre as sequências de leituras correspondentes aos sentidos 0° e 180°.</li> <li>• Situação mais comum.</li> <li>• Único padrão passível de ser confundido com um erro provocado pela deriva do desvio (<i>bias-drift</i>).</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alteração de desvio durante uma sequência de leituras correspondente a determinado sentido (in ex.: 0° ou 180°).</li> <li>• Facilmente identificável através do aumento do desvio padrão das somas das leituras.</li> </ul>
		<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verificam-se duas alterações do desvio na origem.</li> <li>• Facilmente identificável através do aumento do desvio padrão das somas das leituras.</li> </ul>

Na Figura 77 (6.3.3) verifica-se que as campanhas 49R e 49 apresentam os padrões de deslocamento acumulado de acordo com a primeira e segunda linhas do Quadro 21, respetivamente. Nas figuras 80 e 81 apresentam-se, respetivamente, os perfis dos deslocamentos incrementais e das somas das leituras daquelas campanhas. Excluindo a zona superior da instalação, onde se desenvolvem deslocamentos efetivos, na Figura 80 observam-se os padrões de deslocamento incremental das duas primeiras linhas do Quadro 21. Na Figura 81 verifica-se que a alteração do desvio é bem visível apenas na campanha 49.

Por comparação das figuras 80 e 81 conclui-se:

- a) a não ser que se verifique uma alteração de desvio muito abrupta, a análise da evolução da média (6.3.2) e do desvio padrão (6.3.3) das somas das leituras só permite detetar este tipo de erro quando o mesmo ocorre durante uma série de leituras (in ex.: campanha 49);
- b) mesmo com deslocamentos incrementais moderados e na presença de perfis de somas de leituras aparentemente normais, a alteração do desvio na origem pode introduzir erros importantes nos deslocamentos acumulados (in ex.: campanha 49R).

O ponto *a)* demonstra que a análise estatística destes indicadores nunca deve ser entendida como definitiva e não substitui os procedimentos de verificação metrológica descritos em 4.7.2.

O ponto *b)* demonstra a importância do acompanhamento dos deslocamentos incrementais e do controlo de qualidade como complemento ao julgamento técnico. Pois, a análise geotécnica concentra-se frequente e maioritariamente sobre os deslocamentos acumulados e raramente dá a importância devida à análise dos deslocamentos incrementais.

A correção do *bias-shift error* através dos deslocamentos consiste em quantificar e subtrair a constante de erro introduzida. Existem duas metodologias possíveis<sup>1</sup>:

*i. Correção com base nos deslocamentos incrementais:*

1. definir uma zona de tubo geotecnicamente estável;
2. calcular o deslocamento incremental médio ao longo da zona previamente definida;
3. subtrair o valor médio calculado ao deslocamento incremental de cada secção afetada.

*ii. Correção com base nos deslocamentos acumulados* (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000):

1. definir uma zona de tubo geotecnicamente estável (*n* profundidades);
2. calcular o valor do *bias-shift error* ( $\varepsilon_{bs}$ ) a partir do deslocamento acumulado máximo ( $\Delta D_n$ ) da zona previamente definida:  $\varepsilon_{bs} = \Delta D_n / n$ ;
3. subtrair  $\varepsilon_{bs}$  ao deslocamento incremental ou  $n\varepsilon_{bs}$  ao deslocamento acumulado de cada secção afetada.

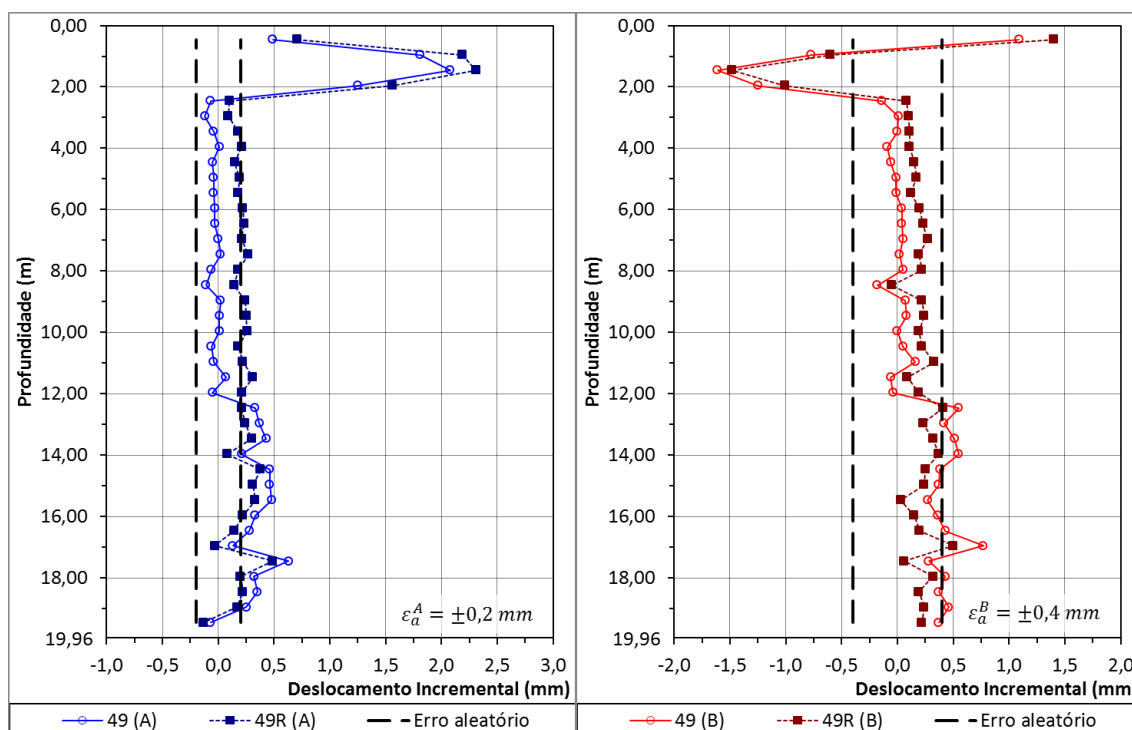


Figura 80 – Deslocamentos incrementais das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3).

<sup>1</sup> Na verdade os dois métodos são equivalentes, uma vez que, sendo constante,  $\varepsilon_{bs}$  corresponde ao deslocamento incremental médio.

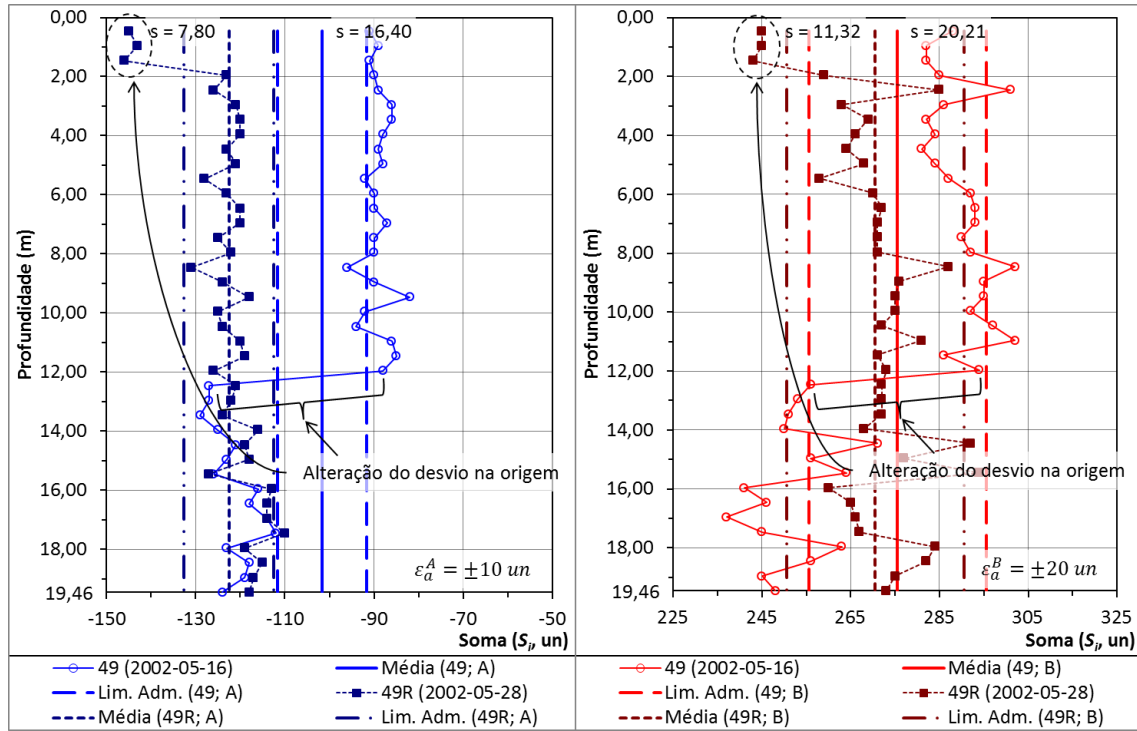


Figura 81 – Somas das leituras das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3).

A correção do *bias-shift error* com base nas somas das leituras pode tomar diferentes formas de aplicação, dependendo da ocorrência do mesmo durante uma sequência de leituras (in ex.: campanha 49), em zona estável ou instável, ou entre sequências de leituras (in ex.: campanha 49R). Estes métodos foram desenvolvidos pelo autor deste trabalho no Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) com o objetivo de proceder à correção de erros sistemáticos pontuais (6.4.7). Mais recentemente o autor adaptou estas metodologias à análise e correção deste tipo de fenómeno. Apresenta-se de seguida a fundamentação respetiva.

Sendo  $l_i^0$  e  $l_i^{180}$  as componentes de medição em sentidos opostos da secção  $i$  ((80), 6.3.1), a subtração entre componentes homólogas de uma campanha ordinária  $p$  e da respetiva referência  $r$  traduz-se pela expressão (90), onde  $\Delta d_i$  é o deslocamento calculado em cada sentido,  $\Delta b$  é o diferencial entre os desvios na origem à data de cada campanha, e  $\varepsilon'_{s,r,i} \cong 0$ , uma vez que se assume a boa qualidade da campanha de referência.

$$\begin{cases} l_{p,i}^0 - l_{r,i}^0 = k \sin \delta_{p,i}^0 + b_p \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,p,i} - (k \sin \delta_{r,i}^0 + b_r \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,r,i}) \\ l_{p,i}^{180} - l_{r,i}^{180} = k \sin \delta_{p,i}^{180} + b_p \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,p,i} - (k \sin \delta_{r,i}^{180} + b_r \pm \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,r,i}) \end{cases} \Leftrightarrow$$

$$\Leftrightarrow \begin{cases} \Delta l_i^0 = \Delta d_i^0 + \Delta b \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,p,i} \\ \Delta l_i^{180} = \Delta d_i^{180} + \Delta b \pm \sqrt{2} \varepsilon'_a + \varepsilon'_{s,p,i} \end{cases}; \Delta l_i = l_{p,i} - l_{r,i}; \Delta b = b_p - b_r; \varepsilon'_{s,r,i} = 0 \quad (90)$$

Numa zona de tubo considerada estável, onde não se espera o desenvolvimento de deslocamentos,  $\Delta d_i^0 = \Delta d_i^{180} = 0$ . Logo, a subtração das componentes de deslocamento obtidas na equação anterior pode escrever-se na forma:

$$\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} = \pm 2\varepsilon'_a + \varepsilon_{s,p,i}^{'0} - \varepsilon_{s,p,i}^{'180} \quad (91)$$

Conhecendo-se a relação  $\varepsilon'_a = \varepsilon_a/\sqrt{2}$  ((82), 6.3.1), é possível exprimir a equação (91) em função do erro típico do sistema:

$$\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon_{s,p,i}^{'0} - \varepsilon_{s,p,i}^{'180} \quad (92)$$

Ou seja, quando  $|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}| > 2 \varepsilon_a/\sqrt{2}$  numa zona do tubo considerada estável, verifica-se a existência de erros sistemáticos num ou em ambos os sentidos de medição. Portanto, a equação (92) permite aferir e quantificar o erro sistemático em ambas as situações retratadas na Figura 81.

Considere-se agora a inversão<sup>1</sup> dos perfis de somas da campanha 49 (Figura 81). Neste caso a equação (92) não é aplicável, dado que  $\{\Delta d_i^0; \Delta d_i^{180}\} \neq 0$  ao longo da zona afetada pelo erro. No entanto, sabe-se que  $\Delta d_i^0 = -\Delta d_i^{180}$  e que  $2b \cong \mu$  ((85), 6.3.2). Logo, o erro pode ser aferido e quantificado pela soma das componentes obtidas na equação (90), uma vez que é possível estimar os valores das médias das somas das campanhas  $p$  ( $\mu_p$ , ao longo da zona da instalação não afetada pelo erro) e  $r$  ( $\mu_r$ ):

$$\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon_{s,p,i}^{'0} + \varepsilon_{s,p,i}^{'180}; 2\Delta b = \mu_p - \mu_r \quad (93)$$

Recordando-se a equação (90) em condição de estabilidade geotécnica, com  $\Delta d_i^0 = \Delta d_i^{180} = 0$  e  $\varepsilon'_a = \varepsilon_a/\sqrt{2}$ , o sentido a corrigir pode identificar-se em função do erro típico do sistema:

$$\Delta l_i - \Delta b = \pm \varepsilon_a + \varepsilon_{s,p,i}^{'0}; \Delta b = \frac{\mu_p - \mu_r}{2} \quad (94)$$

Considerando-se a equação (94):

- quando o *bias-shift* ocorre durante uma sequência de leituras,  $\mu_p$  pode ser calculado a partir do conjunto de somas não afetadas pelo erro (in ex.: campanha 49);
- quando o *bias-shift* ocorre entre sequências de leituras, pode utilizar-se a média das somas das leituras da campanha anterior<sup>2</sup>, correspondendo o sentido a corrigir ao que apresentar maior disparidade entre os valores de  $|\Delta l_i - \Delta b|$  e de  $\varepsilon_a$ , sendo  $\Delta b = (\mu_{p-1} - \mu_r)/2$ ;
- quando o *bias-shift* afeta apenas uma zona instável, o sentido a corrigir só pode ser identificado por tentativa e erro juntamente com a contextualização geotécnica adequada (in ex.: corrigindo um sentido ou outro e observando os resultados). Portanto, esta equação não é aplicável a estes casos (in ex.: perfis invertidos<sup>1</sup> das somas das leituras da campanha 49).

Por fim, a correção do *bias-shift error* através das somas das leituras pode fazer-se:

<sup>1</sup> Ou seja, a ocorrência do *bias-shift* na zona superior do tubo (in ex.: em zona instável).

<sup>2</sup> Efetivamente, desconhece-se o desvio na origem dos sensores afetados à data da campanha  $p$ . No entanto, caracterizando-se o *bias-shift* por um acontecimento isolado e sabendo-se que o desvio na origem não sofre alterações significativas a curto prazo, a recorrência à média das somas das leituras da campanha anterior é aceitável na grande maioria dos casos, tal como a experiência o demonstra. Contudo, este procedimento é sempre mais fiável quando acompanhado de registos periódicos de verificação inclinométrica (4.7.2).



- a) em função da diferença entre a média das somas de leituras a corrigir e  $\mu_p$ ;
- b) por subtração do erro sistemático resultante das equações (92) ou (93).

O método a) é de aplicação mais simples e é exequível sempre que seja possível calcular a média das somas da campanha  $p$  (in ex.: campanha 49, a partir do conjunto de somas não afetadas pelo erro, independentemente da zona do tubo afetada). Depois de identificado o sentido a corrigir através da equação (94)<sup>1</sup>, as leituras respetivas são corrigidas por aplicação da equação (95), onde  $l_{c,p,i}$  é a leitura corrigida da campanha  $p$  na secção  $i$  e  $\bar{S}_i = \sum S_i/n$  é a média de somas de leituras do conjunto de secções afetadas pelo erro.

$$l_{c,p,i} = l_{p,i} - (\bar{S}_i - \mu_p) \quad (95)$$

O método b) aplica-se a qualquer situação e constitui a única solução perante a impossibilidade de cálculo de  $\mu_p$  (in ex.: campanha 49R). O primeiro passo é o cálculo do deslocamento médio em cada sentido de uma zona considerada estável<sup>2</sup> ( $n$  profundidades):

$$\bar{\Delta l} = \sum_{i=1}^n (l_{p,i} - l_{r,i})/n \quad (96)$$

Então, o valor do erro sistemático obtém-se substituindo  $\Delta l_i$  por  $\bar{\Delta l}$  na equação (92)<sup>3</sup> ou (93)<sup>2</sup>:

$$\bar{\Delta l}^0 - \bar{\Delta l}^{180} \cong \varepsilon_{s,p}^{'0} - \varepsilon_{s,p}^{'180} \quad (97)$$

$$\bar{\Delta l}^0 + \bar{\Delta l}^{180} - 2\Delta b \cong \varepsilon_{s,p}^{'0} + \varepsilon_{s,p}^{'180} \quad (98)$$

Depois de identificado o sentido a corrigir, substituindo  $\Delta l_i$  por  $\bar{\Delta l}$  na equação (94)<sup>1</sup>, as leituras afetadas são corrigidas por subtração do erro sistemático anteriormente obtido:

$$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = l_{p,i}^0 - (\bar{\Delta l}^0 - \bar{\Delta l}^{180}) \\ l_{c,p,i}^{180} = l_{p,i}^{180} + (\bar{\Delta l}^0 - \bar{\Delta l}^{180}) \end{cases} \quad (99)$$

$$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = l_{p,i}^0 - (\bar{\Delta l}^0 + \bar{\Delta l}^{180} - 2\Delta b) \\ l_{c,p,i}^{180} = l_{p,i}^{180} - (\bar{\Delta l}^0 + \bar{\Delta l}^{180} - 2\Delta b) \end{cases} \quad (100)$$

Na Figura 82 apresentam-se as curvas de deslocamentos acumulados das campanhas 48, 49, 49R e 50. Na mesma figura incluem-se os perfis das campanhas 49 e 49R corrigidos pelos métodos das somas das leituras (49-Si e 49R-Si) e dos deslocamentos (49-D e 49R-D). Verifica-se que ambas as metodologias de correção produzem resultados idênticos e satisfatórios. Os procedimentos de correção aplicados encontram-se descritos com maior detalhe no Anexo VI.

Na Figura 83 apresentam-se dois ábacos que permitem estimar o erro sistemático introduzido pe-

<sup>1</sup> Recorde-se que o sentido a corrigir só é identificável quando o erro afeta uma zona do tubo geotecnicaamente estável.

<sup>2</sup> No caso do *bias-shift* afetar apenas uma zona instável, as componentes de deslocamento médio devem englobar toda essa zona.

<sup>3</sup> No caso do *bias-shift* afetar apenas uma zona instável, a substituição tem que ser feita na equação (93).

lo *bias-shift* ( $\varepsilon_{bs}$ ) em resultados acumulados. A correção pelo método dos deslocamentos é de aplicação mais fácil e é a prática recomendada. No entanto, a metodologia baseada na análise de somas de leituras permite:

- identificar e quantificar a presença do erro de forma objetiva;
- identificar o sentido onde o erro ocorre;
- corrigir as leituras quando só são afetadas zonas instáveis da instalação.

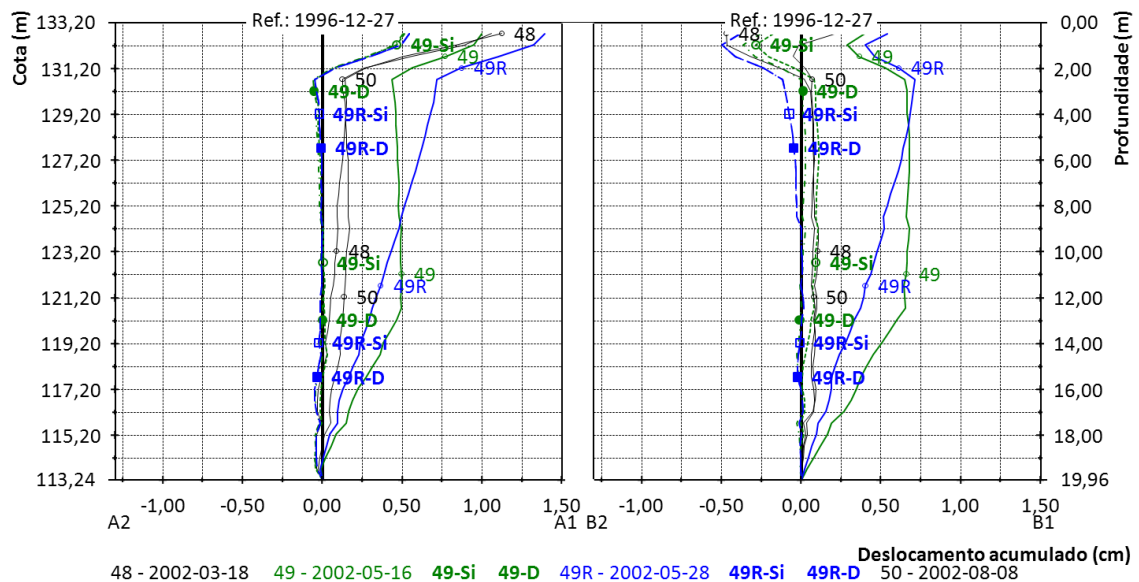
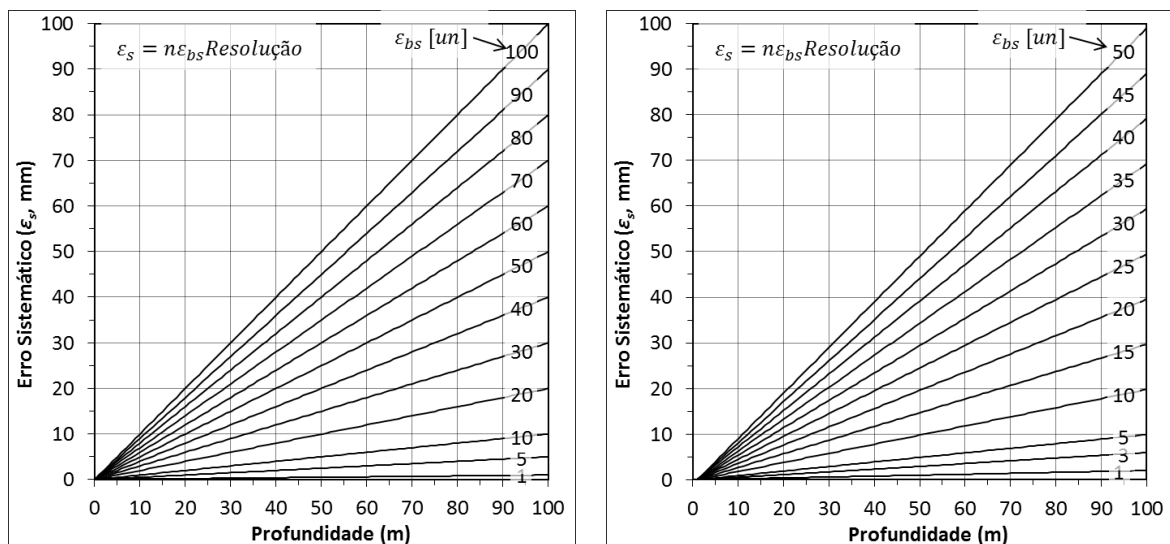


Figura 82 – Deslocamentos acumulados das campanhas 49 e 49R nas direções A e B (Figura 77, 6.3.3). Curvas obtidas (49 e 49R) e corrigidas pelos métodos das somas das leituras (49-Si e 49R-Si) e dos deslocamentos (49-D e 49R-D).



a) Resolução: 0,01 mm/un.

b) Resolução: 0,02 mm/un.

Figura 83 – Erro sistemático introduzido em resultados acumulados pela ocorrência dum *bias-shift* ( $\varepsilon_{bs}$ ) ao longo de  $n$  profundidades em instrumentos com resolução 0,01 – 0,02 mm/un (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000).

### 6.4.3. Erro de rotação (*rotation error*)

O erro de rotação deve-se à alteração do alinhamento axial da sonda ou dos sensores inclinométricos. Este fenómeno provoca alterações ao nível da influência interaxial (*cross-axis*), que se caracteriza pelo erro que a inclinação do tubo numa determinada direção induz na inclinação medida em direção ortogonal. Como consequência, a magnitude do erro é diretamente proporcional à inclinação do tubo inclinométrico (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000).

A ocorrência deste fenómeno pode dever-se a (Coimbra, 2011; SINCO, 2000):

- desgaste do instrumento (in ex.: desalinhamento gradual dos acelerómetros);
- fadiga e desgaste das rodas do instrumento e das respetivas molas (in ex.: alterações inconsistentes e variáveis, muito difíceis de diagnosticar e de corrigir);
- choque sofrido pela sonda (in ex.: alteração repentina, podendo afetar as direções *A* e *B* separadamente);
- reparação/afinação da sonda (in ex.: realinhamento axial dos acelerómetros);
- substituição da sonda (in ex.: alteração do alinhamento dos sensores);

É importante não confundir o erro de rotação com a espiral das calhas inclinométricas, já que a segunda não é um erro de medição. O erro de rotação caracteriza-se por uma constante de rotação do referencial de medição, podendo afetar uma ou ambas as direções, conjunta ou separadamente. A espiral das calhas inclinométricas caracteriza-se por uma rotação contínua da orientação azimutal da sonda ao longo de uma zona limitada ou da totalidade do tubo, afetando sempre as duas direções de igual forma. Este fenómeno é brevemente abordado na secção 6.4.6.

A identificação do erro de rotação faz-se por comparação do perfil de deslocamentos acumulados em determinada direção com o perfil de desvios acumulados em direção ortogonal. Devem verificar-se três condições para que se trate de um erro de rotação (SINCO, 2000):

- o deslocamento acumulado apresenta um perfil curvo, quando deveria ser retilíneo;
- o desvio acumulado na direção ortogonal apresenta uma inclinação considerável<sup>1</sup>;
- os dois gráficos apresentam um padrão de forma idêntico.

O ângulo de rotação ( $\vartheta$ ) numa determinada direção obtém-se pela relação entre os deslocamentos nessa direção e os desvios na direção que lhe é ortogonal ( $(101)$ ). Na Figura 84 ilustra-se esta relação.

$$\begin{cases} \vartheta_A = \sin^{-1} \frac{\Delta D^A}{D^B} \\ \vartheta_B = \sin^{-1} \frac{\Delta D^B}{D^A} \end{cases} \quad (101)$$

<sup>1</sup> Não se procedeu a qualquer estudo sobre o que significa “uma inclinação considerável”. Subentende-se que o erro será visível e mensurável para inclinações superiores às recomendadas (in ex.:  $|\delta| > 3 - 5^\circ$ ).

O ângulo  $\vartheta$  pode determinar-se em função dos valores incrementais ou acumulados. Contudo, os valores acumulados são preferíveis porque garantem que a expressão (101) é sempre válida (in ex.:  $\Delta D < D$ ). Mikkelsen (2003) exemplifica a obtenção de  $\vartheta$  com base na totalidade dos deslocamentos acumulados. Esta prática resulta em valores satisfatórios desde que o erro introduzido seja muito superior aos deslocamentos ocorridos, o que geralmente se confirma. No entanto, a estimativa de  $\vartheta$  pode ser afetada em instalações onde se verifiquem deslocamentos importantes (Anexo VII). Portanto, será preferível proceder à estimativa de  $\vartheta$  da seguinte forma:

1. definir uma zona da instalação assumidamente estável;
2. calcular  $\vartheta$  em cada secção da zona previamente definida, de acordo com a expressão (101);
3. utilizar o valor médio dos ângulos previamente calculados para efeitos de correção.

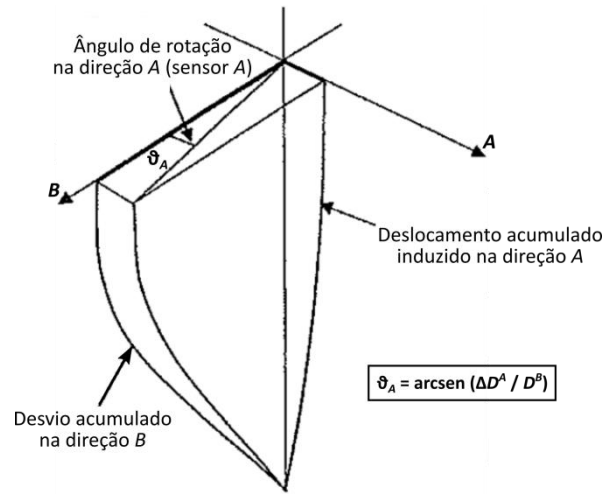


Figura 84 – Relação entre o ângulo de rotação do referencial de medição e o erro induzido nos deslocamentos calculados (adaptado de Mikkelsen, 2003).

A correção do erro de rotação baseia-se nas equações matemáticas que descrevem a rotação de um ponto no espaço euclidiano bidimensional (Mikkelsen, 2003):

$$\begin{cases} x = x' \cos \vartheta - y' \sin \vartheta \\ y = x' \sin \vartheta + y' \cos \vartheta \end{cases} \quad (102)$$

sendo  $\vartheta$  o ângulo de rotação no sentido anti-horário,  $(x, y)$  e  $(x', y')$  as coordenadas pós e pré rotação, respetivamente.

Considerando que a rotação é pequena (in ex.:  $\vartheta \leq 1^\circ$ ),  $\cos \vartheta \cong 1$ . Logo, a equação (102) pode reescrever-se na forma (Mikkelsen, 2003):

$$\begin{cases} x = x' - y' \sin \vartheta \\ y = x' \sin \vartheta + y' \end{cases} \quad (103)$$

Mikkelsen (2003) atribui a coordenada  $x$  à direção  $B$  e a coordenada  $y$  à direção  $A$ , uma vez que, de acordo com a convenção matemática, a última se orienta no sentido anti-horário relativamen-

te à primeira. Contudo, será demonstrado que esta condição não é válida<sup>1</sup>.

Considerando uma curva de desvios e as expressões (102) e (103), o ângulo  $\vartheta$  exprime a rotação daquele conjunto de pontos no plano coordenado, da posição pré correção  $(x', y')$  para a posição pós correção  $(x, y)$ . Portanto, procura-se que na equação (101) o valor de  $\sin^{-1} \Delta D / D$ :

- seja simétrico ao ângulo de rotação do conjunto de pontos no sentido  $(x, y) \rightarrow (x', y')$ ;
- seja igual ao ângulo de rotação do referencial no sentido  $(x, y) \rightarrow (x', y')$ , uma vez que, de acordo com a convenção matemática, o ângulo de rotação de um eixo cartesiano é simétrico ao ângulo de rotação equivalente de um ponto no espaço euclidiano.

Analisando a relação do ângulo de rotação do referencial ( $\vartheta'$ ) no sentido  $(x, y) \rightarrow (x', y')$  com o valor de  $\vartheta$  que resulta de  $\sin^{-1} \Delta D / D$  em cada direção, verifica-se (Figura 85):

$$\begin{cases} \vartheta_A = -\vartheta' \\ \vartheta_B = \vartheta' \end{cases} \quad (104)$$

Logo, a coordenada  $y$  nas equações (102) e (103), representativa da direção  $A$ , deverá sofrer uma mudança de sinal. Assim, os desvios corrigidos nas direções  $A$  e  $B$  obtêm-se de acordo com:

$$\begin{cases} d_{c,i}^A = d_i^A - D_i^B \sin \vartheta_A \\ d_{c,i}^B = d_i^B - D_i^A \sin \vartheta_B \end{cases} \vee \begin{cases} D_{c,i}^A = D_i^A - D_i^B \sin \vartheta_A \\ D_{c,i}^B = D_i^B - D_i^A \sin \vartheta_B \end{cases} \quad (105)$$

onde  $d_c$  e  $D_c$  são os desvios incrementais e acumulados corrigidos, respetivamente.

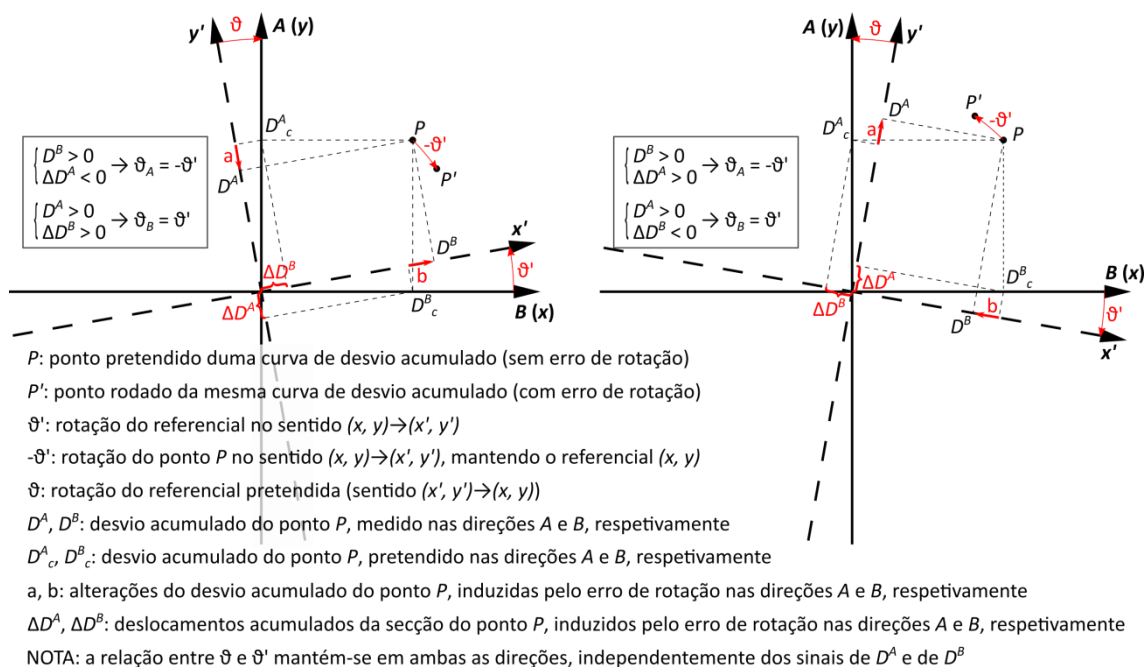


Figura 85 – Relação entre os sinais dos ângulos de rotação estimado ( $\vartheta$ ) e pretendido ( $\vartheta'$ ) em cada direção.

<sup>1</sup> Mikkelsen (2003) e SINCO (2000) recomendam o programa comercial DigiPro para efetuar a correção de erros de rotação. Verifica-se que o DigiPro2 (DGSi, 2014c) aplica a expressão (103), atribuindo a coordenada  $x$  à direção  $A$  e a coordenada  $y$  à direção  $B$ , o que também não é válido.

Alternativamente, a expressão (105) pode aplicar-se diretamente às leituras por substituição de  $d^A$  e  $d^B$  por  $l^A$  e  $l^B$ , respetivamente. Neste caso, cada par de leituras deverá corrigir-se em função dos valores homólogos da direção ortogonal, havendo sempre necessidade de corrigir ambos os sentidos (in ex.:  $l_c^{A0} = l^{A0} - l^{B0} \sin \vartheta_A \wedge l_c^{A180} = l^{A180} - l^{B180} \sin \vartheta_A$ ;  $l_c^{B0} = l^{B0} - l^{A0} \sin \vartheta_B \wedge l_c^{B180} = l^{B180} - l^{A180} \sin \vartheta_B$ ).

Partindo-se da equação (105) é também possível estimar a magnitude do erro em cada secção:

$$\begin{cases} d_i^A - d_{c,i}^A = d_i^B \sin \vartheta_A = \varepsilon_{s,i}^A \\ d_i^B - d_{c,i}^B = d_i^A \sin \vartheta_B = \varepsilon_{s,i}^B \end{cases} \vee \begin{cases} D_i^A - D_{c,i}^A = D_i^B \sin \vartheta_A = \sum_i \varepsilon_{s,i}^A \\ D_i^B - D_{c,i}^B = D_i^A \sin \vartheta_B = \sum_i \varepsilon_{s,i}^B \end{cases} \quad (106)$$

Na Figura 86 apresentam-se os deslocamentos acumulados referentes a um caso de obra que envolveu a substituição do sistema inclinométrico habitualmente utilizado. Observa-se que as campanhas 23-1DG e 23R-1DG, executadas com o novo equipamento, se destacam das campanhas anteriores. Não houve possibilidade de executar estas campanhas em data próxima à última campanha executada com o sistema habitual. Dado o tempo decorrido entre campanhas e as especificidades da obra, o uso de múltiplas referências não foi considerado (5.6). Por esta razão, os resultados de ambos os sistemas inclinométricos foram conciliados por correção de um erro de rotação nas campanhas pertencentes ao novo equipamento. Na Figura 86 apresentam-se também as curvas das campanhas corrigidas, 23-1DG\_C e 23R-1DG\_C. Verifica-se um bom enquadramento entre as novas campanhas relativamente às anteriores. Neste caso, os ângulos de rotação estimados são  $\vartheta_A = -0,90^\circ$  e  $\vartheta_B = 0,82^\circ$ . Os procedimentos de correção aplicados encontram-se descritos com maior detalhe no Anexo VII.

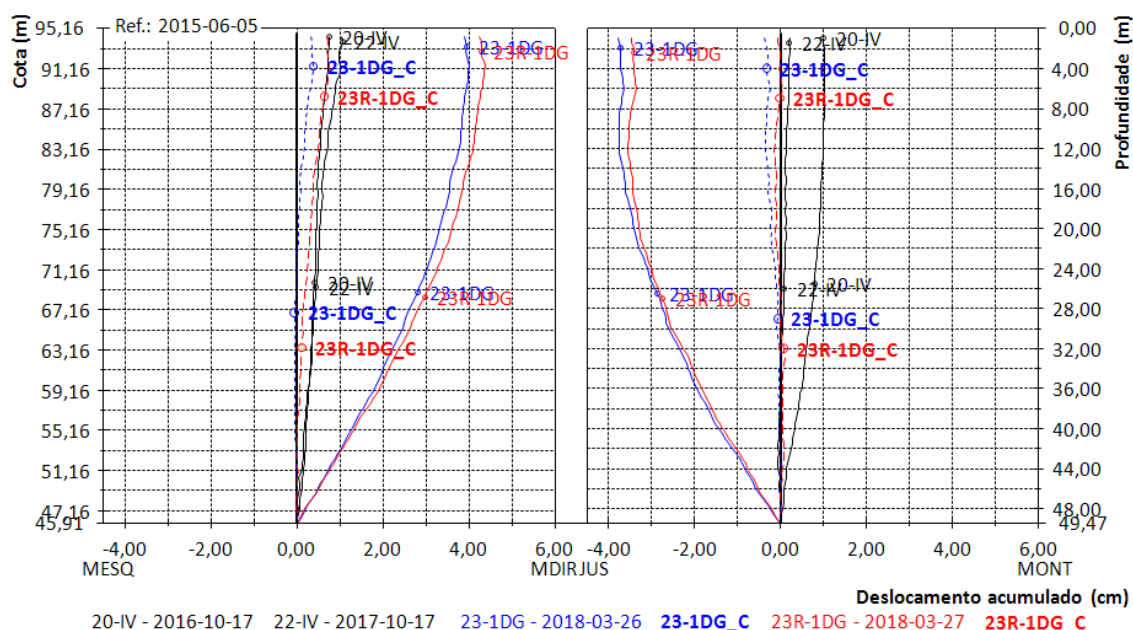


Figura 86 – Correção de um erro de rotação devido a diferenças de alinhamento axial entre os sensores de dois sistemas inclinométricos.

Na figura seguinte apresenta-se um ábaco que permite estimar o erro induzido nos deslocamentos de determinada direção, em função do desvio na direção ortogonal e do ângulo de rotação estimado.

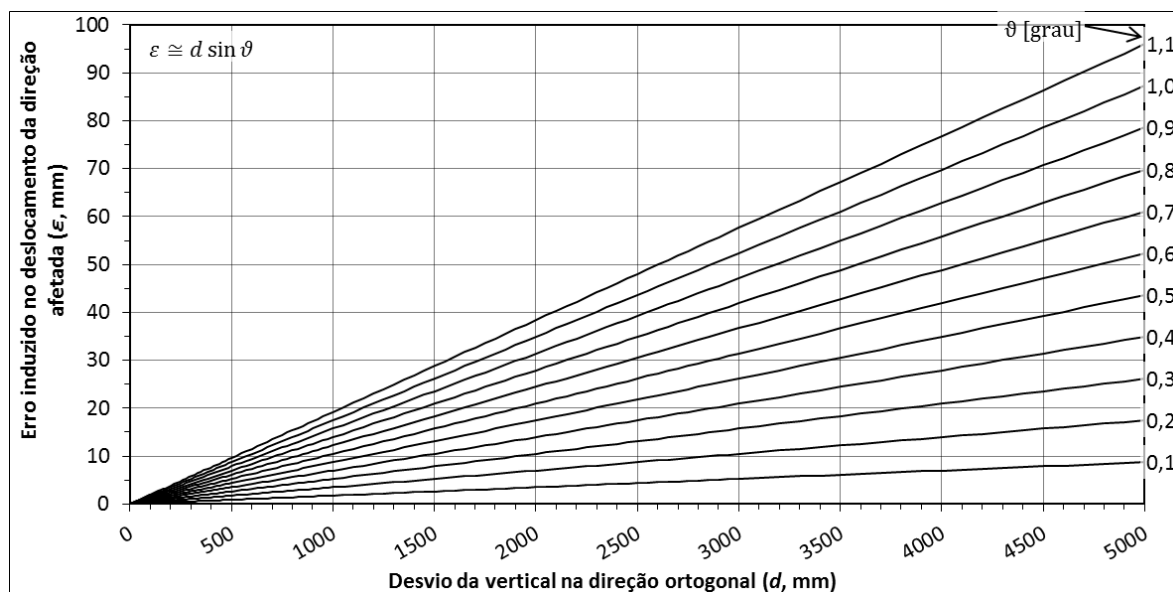


Figura 87 – Magnitude do erro de rotação em função do ângulo respetivo e do desvio da vertical na direção ortogonal (adaptado de Coimbra, 2011).

#### 6.4.4. Erro de profundidade (*depth error*)

O erro de profundidade deve-se ao posicionamento erróneo da sonda durante a execução de uma campanha inclinométrica e caracteriza-se por deslocamentos incongruentes, principalmente em tubos que apresentem curvaturas apreciáveis. A ocorrência deste tipo de erro pode dever-se a múltiplos fatores, tais como (Mikkelsen, 2003; SINCO, 2000):

- estacionamento da marca do cabo fora da tolerância recomendada de 6 mm (4.4);
- alterações dimensionais do cabo<sup>1</sup>;
- alterações dimensionais do tubo inclinométrico<sup>2</sup>;
- alteração do ponto de referência no topo do tubo inclinométrico<sup>3</sup>;
- início da medição na profundidade errada<sup>4</sup>.

A deteção deste tipo de erro faz-se por comparação das curvas de deslocamentos acumulados da campanha a corrigir com as de desvios incrementais da respetiva referência, tendo as duas curvas padrões de forma semelhantes. A semelhança entre aqueles padrões de forma depende da geometria do tubo e do sentido em que o erro ocorre (in ex.: abaixo ou acima da posição de referên-

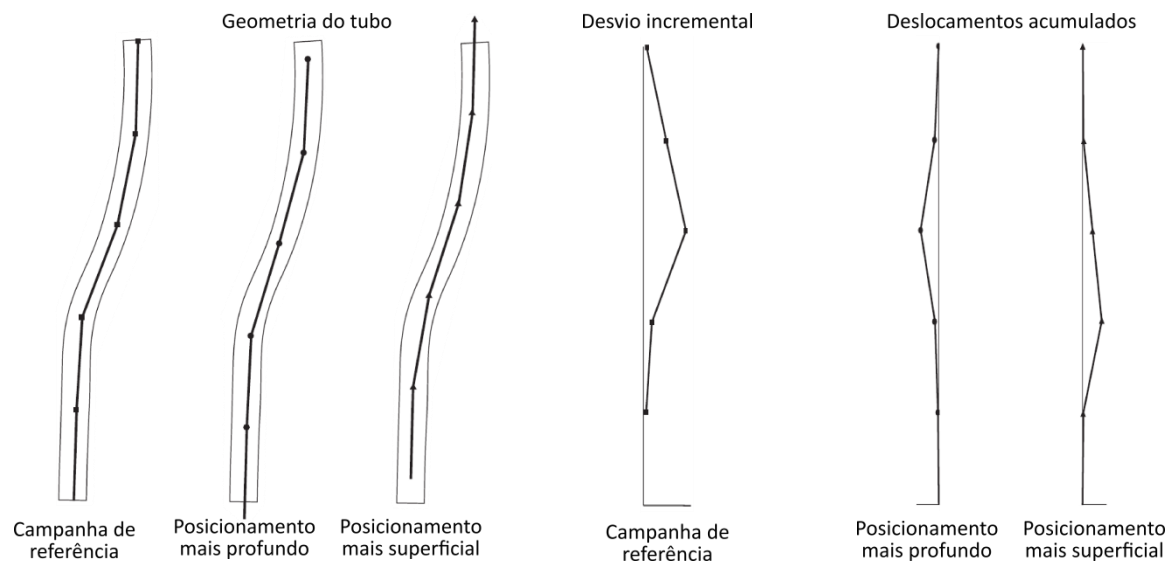
<sup>1</sup> Por exemplo, devido a fadiga, reparação ou substituição.

<sup>2</sup> Por exemplo, devido à ocorrência de assentamentos, ao prolongamento/encurtamento do tubo durante a execução de um aterro/escavação, ou devido ao corte do tubo após danificação do mesmo.

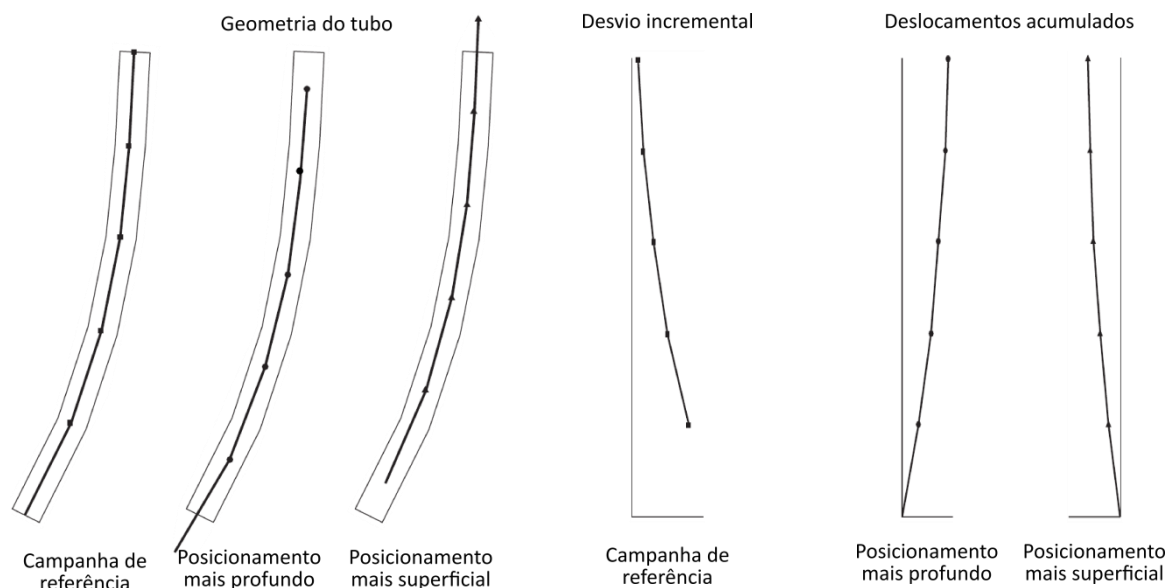
<sup>3</sup> Por exemplo, por substituição do dispositivo de referência para controlo da profundidade (4.4) ou do próprio sistema inclinométrico.

<sup>4</sup> Este fenómeno ocorre com alguma frequência devido ao assoreamento ou à lavagem do fundo da instalação. Neste caso basta retirar as leituras em excesso, em caso de lavagem, ou copiar as leituras homólogas da campanha anterior, em caso de assoreamento.

cia). Na Figura 88 ilustra-se o efeito produzido pelo erro de profundidade em duas geometrias de tubo muito frequentes e conforme o posicionamento se faça abaixo ou acima do habitual.



a) Geometria em "S".



b) Geometria em "J".

Figura 88 – Padrões de forma tipicamente produzidos pelo erro de profundidade em tubos com perfil em "S" e em "J" (adaptado de Coimbra, 2011; SINCO, 2000).

Este erro é de fácil correção, desde que se conheça o valor do desfaseamento entre as profundidades de leitura da campanha referência e da campanha a corrigir. Caso contrário, aquele valor terá de ser estimado por tentativa e erro, podendo este processo tornar-se bastante moroso e potencialmente infrutífero. Naturalmente, este erro é também difícil de diagnosticar e de corrigir quando o desfaseamento entre profundidades é variável.

A correção do erro de profundidade requer a estimativa da curvatura do tubo em cada secção  $i$



( $C_i$ ), podendo esta calcular-se por interpolação entre medições consecutivas<sup>1</sup>:

$$C_i = \frac{d_{i+1} - d_i}{L} \quad (107)$$

onde  $d_{i+1}$  é o desvio incremental da secção superior à secção  $i$  e  $L$  é o passo de leitura.

Conhecendo-se os valores do desfasamento entre profundidades ( $\varepsilon_p$ ) e da curvatura ( $C_i$ ), a correção ( $d_{c,i}$ ) faz-se por adição ou por subtração do produto entre estas variáveis, conforme o posicionamento seja mais profundo ou mais superficial do habitual, respetivamente<sup>2</sup>:

$$d_{c,i} = d_i \pm C_i \varepsilon_p \quad (108)$$

Na verdade, este processo adiciona/subtrai ao desvio da secção  $i$  uma porção equivalente a uma medição com passo de leitura  $\varepsilon_p$ , o que equivale à interpolação entre leituras consecutivas:

$$C_i \varepsilon_p = \pm \frac{d_{i+1} - d_i}{L} \varepsilon_p = \pm \frac{L \sin(\delta_{i+1} - \delta_i)}{L} \varepsilon_p = \pm \varepsilon_p \sin \Delta \delta_i; \delta = \theta \vee \delta = \beta \quad (109)$$

A fim de garantir que a correção se faz por interpolação, o método deve ser aplicado no sentido ascendente ou descendente, conforme o posicionamento seja mais profundo ou mais superficial, respetivamente. Desta forma, será necessário estimar o desvio no topo ou na base do tubo, respetivamente. Quando o posicionamento é mais superficial e é necessário estimar a medição na base do tubo, os valores obtidos podem manter-se, já que não serão expectáveis movimentações significativas naquela zona. Caso contrário pode assumir-se a mesma curvatura (in ex.:  $C_n$ ) ou basear a estimativa na taxa de deslocamento verificada àquela profundidade.

Alternativamente, as equações apresentadas podem aplicar-se às próprias leituras inclinométricas (in ex.:  $C_i^0 = (l_{i+1}^0 - l_i^0)/L$ ;  $C_i^{180} = (l_{i+1}^{180} - l_i^{180})/L$ ).

No Anexo VIII apresenta-se um caso de obra que envolve dois sistemas inclinométricos distintos cujos cabos apresentam diferenças de comprimento.

#### 6.4.5. Erro de sensibilidade (*sensitivity error*)

A deriva de sensibilidade<sup>3</sup> caracteriza-se por uma alteração da resposta sensorial face a determinada variação da grandeza a medir, sendo o erro proporcional à inclinação do tubo. A causa para a ocorrência deste fenómeno pode dever-se a (Coimbra, 2011):

- a) deriva excessiva do desvio na origem dos sensores (5.1; 6.3.2);

<sup>1</sup> A formulação apresentada diverge da exposição de Mikkelsen (2003) e de SINCO (2000), no sentido de respeitar a definição de curvatura exposta nas equações (61) e (62) da secção 5.9.

<sup>2</sup> A formulação apresentada diverge da exposição de Mikkelsen (2003) e de SINCO (2000) pelo referido na nota 1 e por se considerar o formato apresentado mais intuitivo.

<sup>3</sup> Na verdade, este tipo de erro é mais corretamente designado por “erro de ganho”. Contudo, opta-se pela manutenção da designação utilizada por Mikkelsen (2003). No Anexo IX esclarece-se esta questão.

- b) período de aquecimento dos componentes elétricos (4.1);
- c) avaria dos acelerómetros ou do respetivo circuito integrado de tratamento de sinal;
- d) ingresso de água na sonda inclinométrica.

A causa *a)* ocorre naturalmente e só representa um problema quando a manutenção dos equipamentos é desadequada (4.7) ou em caso de choque accidental que afete o desvio na origem (in ex.: Figura 74, 6.3.2). Quando a causa da deriva é esta, verifica-se o desenvolvimento de deslocamentos incrementais desde a base da instalação e a semelhança entre os perfis de desvios e de deslocamentos da campanha afetada<sup>1</sup>. Este caso particular de deriva da sensibilidade corresponde a uma perda de linearidade sensorial (Figura 75, 6.3.2) e não é, de um modo geral, visível nos perfis de somas de leituras.

Coimbra (2011) apresenta um método de correção para o tipo de ocorrência *a)* com base num coeficiente de deriva médio ( $\bar{d}_s$ ), estimado a partir da relação entre os deslocamentos verificados numa zona da instalação considerada estável (in ex.: *n* profundidades) e os desvios respetivos<sup>2,3</sup>:

$$\bar{d}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta D_i / D_i)}{n} \quad (110)$$

A correção dos deslocamentos ( $\Delta D_{c,i}$ ) pode fazer-se por subtração do produto entre os desvios respetivos ( $D_i$ ) e o coeficiente  $\bar{d}_s$  (Coimbra, 2011):

$$\Delta D_{c,i} = \Delta D_i - \bar{d}_s D_i \quad (111)$$

Alternativamente a correção pode aplicar-se aos deslocamentos incrementais, bastando para tal substituir as variáveis  $\Delta D_{c,i}$ ,  $\Delta D_i$  e  $D_i$  pelas variáveis a corrigir (in ex.:  $\Delta d_{c,i}$ ,  $\Delta d_i$  e  $d_i$ ).

No caso das leituras inclinométricas a correção aplica-se em ambos os sentidos de acordo com:

$$l_{c,i} = l_i (1 - \bar{d}_s) \quad (112)$$

Alternativamente a correção pode aplicar-se aos desvios incrementais ou acumulados, bastando para tal substituir as variáveis  $l_{c,i}$  e  $l_i$  pelas variáveis a corrigir (in ex.:  $d_{c,i}$  ou  $D_{c,i}$ , e  $d_i$  ou  $D_i$ ).

Na Figura 89 apresenta-se um caso de obra que se reporta a uma avaria e subsequente reparação da unidade de aquisição utilizada. Nesta figura observam-se as curvas de deslocamento da campanha anterior à ocorrência (40), da campanha que incorpora o erro (41) e das correções aplicadas (41\_C, 41\_Cm). O coeficiente de deriva estimado nesta instalação, aplicado à campanha 41\_C,

<sup>1</sup> Este fenómeno poderá assemelhar-se a um erro de alteração do desvio na origem (6.4.2). No entanto, a alteração do desvio na origem produz um deslocamento constante ao longo do tubo, enquanto a alteração de sensibilidade produz deslocamentos correlacionáveis com a inclinação do tubo e, portanto, variáveis ao longo da profundidade.

<sup>2</sup> Coimbra (2011) opta por apresentar  $\bar{d}_s$  em percentagem.

<sup>3</sup> A estimativa de  $\bar{d}_s$  pode fazer-se a partir de valores incrementais ou acumulados. Contudo, é preferível o uso de valores acumulados pelos motivos referidos em 6.4.3.

é  $\bar{d}_s = -0,7331$ . Contudo, sabendo-se que os erros de sensibilidade se mantêm e são repetíveis, será preferível determinar um coeficiente médio baseado em resultados de várias instalações. A campanha 41\_Cm corresponde à correção baseada no coeficiente  $\bar{d}_s = -0,7348$ , decorrente da média ponderada dos coeficientes obtidos em quatro instalações da mesma obra. Considerando-se o erro típico do sistema, a profundidade do tubo e o comportamento expectável da obra<sup>1</sup>, verifica-se que as curvas corrigidas (41\_C e 41\_Cm) se enquadram bem com a curva da campanha anterior (40). A aplicação dos procedimentos de correção apresenta-se com maior detalhe nos anexos IV e IX.

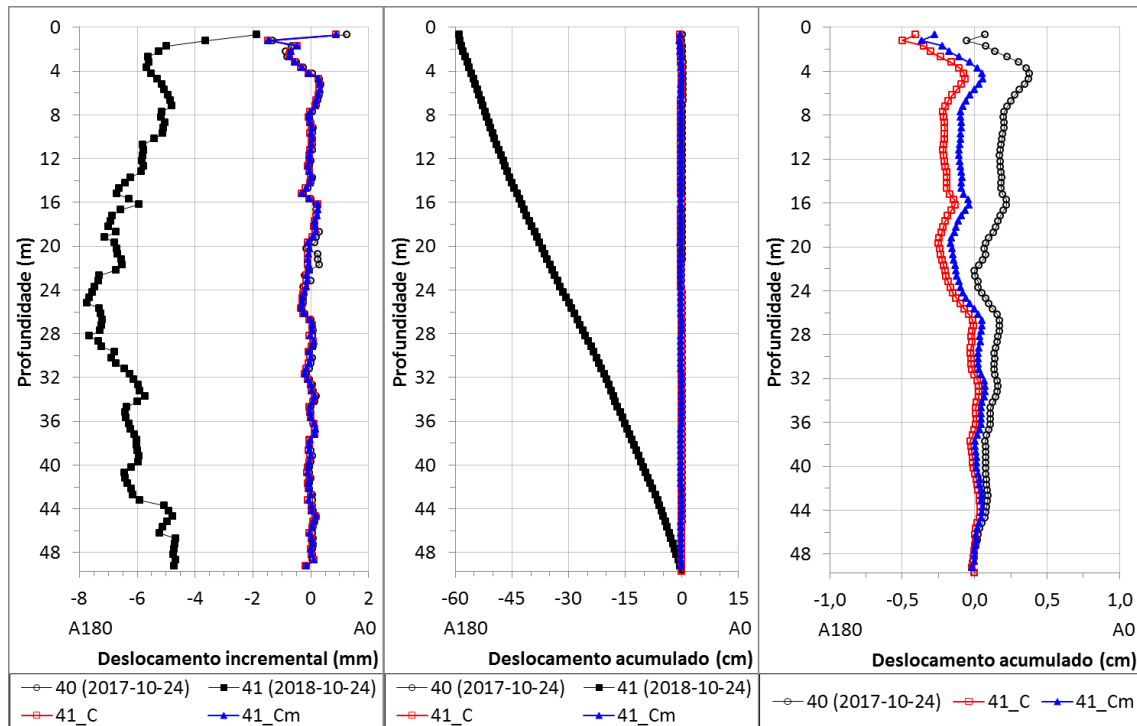


Figura 89 – Exemplo de correção de um erro de sensibilidade devido a alterações ocorridas na unidade de aquisição do sistema inclinométrico.

Na verdade, a deriva/alteração da sensibilidade corresponde a uma alteração da constante instrumental (Quadro 14, 5.1), podendo esta ( $k_c$ ) determinar-se em função da constante de fábrica ( $k$ ) e do coeficiente  $\bar{d}_s$ :

$$k \sin \delta = l(1 - \bar{d}_s) \Leftrightarrow \frac{k}{(1 - \bar{d}_s)} \sin \delta = l = k_c \sin \delta; \sin \delta = l \quad (113)$$

No caso retratado na Figura 89, a constante de fábrica é  $k = 50000$ ,  $k_c = 28850$  para  $\bar{d}_s = -0,7331$  e  $k_c = 28822$  para  $\bar{d}_s = -0,7348$ . A diferença entre as duas constantes determinadas é inferior a 0,1%. No Anexo IX demonstra-se a relação entre os parâmetros de calibração,  $\bar{d}_s$  e  $k_c$ .

<sup>1</sup> Não são esperados movimentos significativos.

Mikkelsen (2003) faz uma breve referência a este tipo de erro e declara a observação de derivas de sensibilidade de 1 – 2%. Contudo, o autor não refere qualquer deriva do desvio na origem associada à ocorrência do fenómeno, nem sugere qualquer método de correção. Na figura seguinte apresenta-se um ábaco que permite estimar o erro induzido nos deslocamentos em função do desvio da vertical e da percentagem de deriva da sensibilidade.

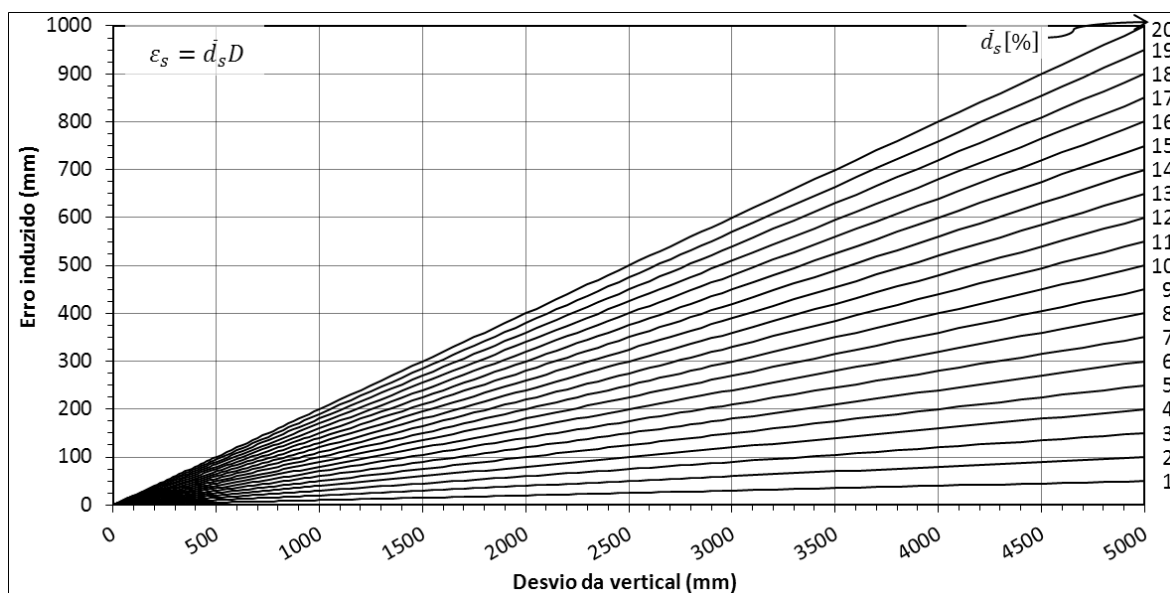


Figura 90 – Magnitude do erro de sensibilidade em função do coeficiente de deriva respetivo e do desvio da vertical do tubo inclinométrico (adaptado de Coimbra, 2011).

As causas *b)*, *c)* e *d)* resultam normalmente em perfis de somas de leituras tendenciosos, com consequências evidentes nos valores da média (6.3.2) e do desvio padrão (6.3.3). Este tipo de ocorrência incorpora duas dificuldades evidentes:

- um perfil de somas tendencioso equivale à ocorrência de uma deriva do desvio na origem durante uma campanha inclinométrica;
- o coeficiente de deriva ( $\bar{d}_s$ ) poderá não ser constante e difícil de determinar.

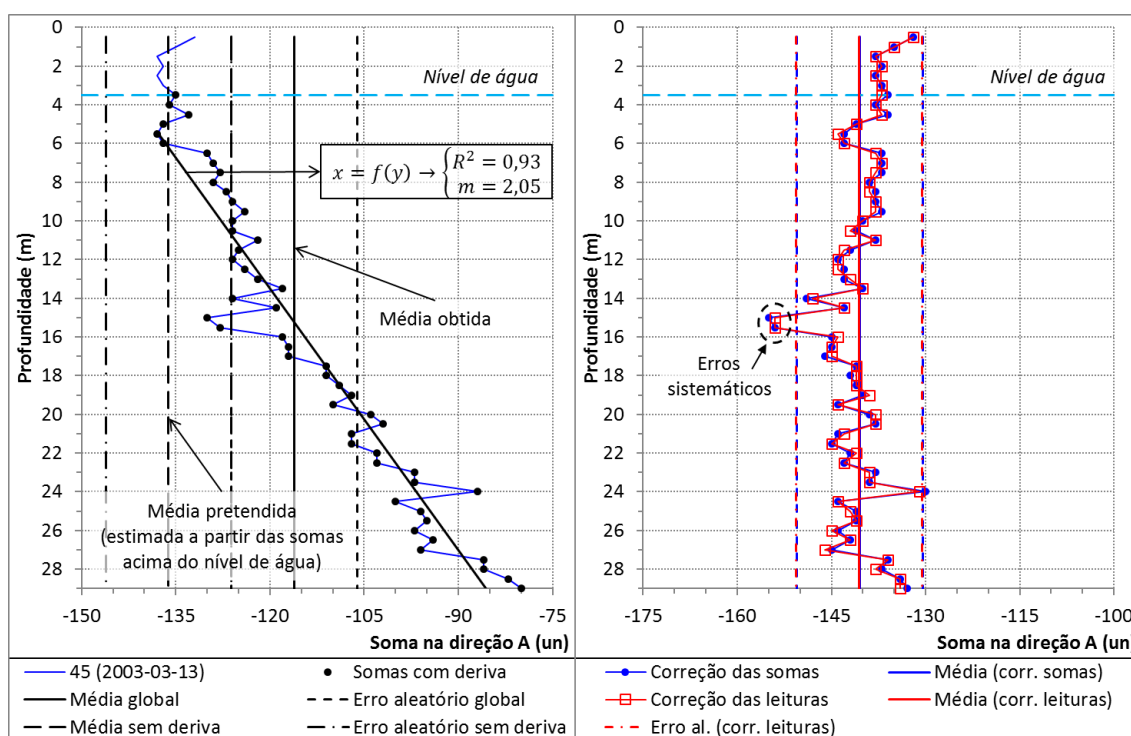
O primeiro ponto dificulta a análise qualitativa das leituras, enquanto o segundo dificulta o diagnóstico e a correção do erro. Portanto, convém primeiro avaliar o desenvolvimento de deslocamentos incrementais numa zona da instalação considerada estável. Caso se verifiquem, o sentido em que ocorrem poderá determinar-se através dos procedimentos de análise das leituras expostos em 6.4.2; caso contrário pode não ser necessário aplicar qualquer correção<sup>1</sup>. Contudo, é vantajoso proceder à correção do perfil de somas para possibilitar a análise qualitativa das mesmas, mesmo sem a presença de um erro de sensibilidade.

Coimbra (2011) apresenta um método de correção do perfil de somas sem que os valores das

<sup>1</sup> Isto é, a deriva pode ser idêntica em ambos os sentidos e não afetar os valores dos desvios calculados.

medições respectivas sejam afetados. A metodologia foi desenvolvida com o objetivo de possibilitar a validação de desvios padrão elevados pela presença de erros pontuais que não impactam os perfis de deslocamentos de forma significativa (Figura 92, 6.4.7). Contudo, na presença de um erro de sensibilidade, a correção das somas não se resume a secções de tubo isoladas, mas incorpora um conjunto significativo ou a totalidade das medições inclinométricas.

Na Figura 91 apresenta-se um exemplo de aplicação referente a uma sonda inclinométrica afetada pelo ingresso de água. Este facto é conhecido porque o nível de água dos tubos inclinométricos é medido com uma sonda piezométrica e a deriva do desvio incia-se sistematicamente àquela profundidade, sendo esta ocorrência consistente em todos os tubos medidos com aquele equipamento. Ademais, a deriva acentua-se com o aumento da pressão hidráulica e verifica-se um agravamento progressivo deste fenómeno ao longo do tempo (Anexo X).



a) Somas de leituras obtidas e função de ajuste para estimativa da taxa de deriva.

b) Somas de leituras corrigidas com indicação dos erros sistemáticos detetados.

Figura 91 – Exemplo de correção de um perfil de somas tendencioso sem afetação dos valores de medição.

Na Figura 91a observa-se:

- o quadrado do coeficiente de correlação ( $R^2$ ) e a taxa de variação ( $m$ ) de uma função linear que exprime a variação das somas  $S_i$  afetadas pela deriva (in ex.: abaixo do nível de água), em função das profundidades de medição respetivas;
- as médias das somas total e parcial (in ex.: calculada a partir das leituras acima do nível de água), incluindo os respetivos limites de confiança relativos ao erro aleatório típico.

Partindo da profundidade do nível de água, a expressão que traduz estimativa das somas ( $S_i$ ) em função das profundidades de medição ( $P_i$ ) é:

$$S_i = mP_i + b \quad (114)$$

onde a deriva  $m$  equivale à taxa de variação e  $b$  é o ponto de origem da função de ajuste.

Conhecendo-se a taxa de variação do desvio na origem (in ex.: por cada incremento  $L$ ), a correção das somas ( $S_{c,i}$ ) pode fazer-se de acordo com a expressão (115), onde  $P_0$  é a profundidade imediatamente anterior à primeira profundidade afetada pela deriva ( $P_1$ ) e  $L$  é o passo de leitura. Associando a equação (115) ao princípio de correção das somas apresentado na secção 6.4.7 (Figura 92), obtém-se a equação (116), permitindo esta a correção das leituras ( $l_{c,i}$ ) com o objetivo de eliminar a deriva da média sem afetar os valores de medição.

$$S_{c,i} = S_i - m(P_i - P_0); P_0 = P_1 - L \quad (115)$$

$$\begin{cases} l_{c,i}^0 = l_i^0 - m(P_i - P_0)/2 \\ l_{c,i}^{180} = l_i^{180} - m(P_i - P_0)/2; P_0 = P_1 - L \end{cases} \quad (116)$$

Na Figura 91b apresenta-se o perfil de somas corrigido em função das equações acima apresentadas. Verifica-se que a deriva da média das somas é efetivamente eliminada, mantendo-se o padrão de variação relativo das somas (in ex.: entre valores consecutivos) e tornando-se possível proceder a uma análise qualitativa dos dados inclinométricos (in ex.: a identificação de erros sistemáticos). As pequenas diferenças entre as somas que derivam das equações (115) e (116) devem-se a remanescentes de arredondamento à unidade. Os procedimentos de correção, incluindo o erro de sensibilidade diagnosticado, apresentam-se com maior detalhe no Anexo X.

#### 6.4.6. Outras causas para a ocorrência de erros sistemáticos generalizados

Outras causas passíveis de incorrer em erros sistemáticos generalizados incluem (Coimbra, 2011):

- inclinação excessiva do tubo inclinométrico;
- curvatura do tubo inclinométrico;
- preenchimento deficiente do espaço anelar entre o tubo e o furo de sondagem (3.4.7), principalmente na presença de vibrações<sup>1</sup>;
- torção das calhas inclinométricas.

A inclinação excessiva dos tubos inclinométricos potencia o erro intrínseco do método de cálculo tradicional (5.10), o aumento da dispersão das medições (Marte & Semprich, 1998; Moormann, 2003; Anexo III) e o erro que possa advir da deriva do desvio na origem dos sensores (Figura 75, 6.3.2; 6.4.2; 6.4.5; Anexo III), incluindo o respetivo desalinhamento axial que ocorre gradualmente

<sup>1</sup> Por exemplo, devido à operação de maquinaria pesada.

(6.4.3). As ações de mitigação resumem-se à aplicação de procedimentos corretos de instalação dos tubos (3), como também de operação e de manutenção dos equipamentos (4).

Curvaturas muito pronunciadas em tubos inclinométricos podem originar erros sistemáticos devido ao desalinhamento axial dos sensores, designadamente em instalações observadas ao longo de vários anos por equipamentos sem manutenção adequada (in ex.: períodos entre calibrações desadequadamente longos). O erro introduzido pode assemelhar-se a um erro de rotação (6.4.3) muito difícil de detetar e de corrigir, uma vez que é provável que não ocorra ao longo de toda a extensão do tubo e que seja afetado por influências inter-axiais. Este tipo de ocorrência evita-se com a correta manutenção e operação dos equipamentos (4) juntamente com procedimentos adequados de armazenamento (3.2.1) e de encastramento do tubo (3.4.6).

O preenchimento desadequado do espaço anelar em torno do tubo inclinométrico pode permitir uma certa oscilação do mesmo durante a execução de campanhas inclinométricas, sendo este fenómeno ampliado pela existência de vibrações. Neste caso verifica-se dificuldade na estabilização de leituras, o que resulta em maior período de operação para realização das campanhas e em maior dispersão nos resultados. Estes acontecimentos devem ser registados e, se possível, investigados. Na secção 6.5.1 ((125)) sugere-se uma forma específica de análise da dispersão neste tipo de instalações.

O desenvolvimento de deslocamentos em sentido incoerente com o que seria expectável deve-se frequentemente à torção das calhas inclinométricas (Figura 23, 3.4.4). Existem equipamentos especializados na identificação deste problema (in ex.: DGSI, 2013d; GEOKON, 2009a). Os sensores de torção, ou de espiral (*spiral sensors*), caracterizam-se por uma sonda semelhante a um inclinómetro com uma junta rotativa entre os dois pares de rodas superior e inferior. A junta contém um sensor, normalmente potenciométrico (Figura 3, 1.2), cujo sinal de resposta é proporcional ao desalinhamento axial entre as duas partes da sonda (SINCO, 2002). Após recolha de uma série de medições sequenciais ao longo do tubo, os dados são corrigidos por aplicação direta da equação (102) (6.4.3) em profundidades interpoladas ou coincidentes com as profundidades de medição inclinométrica. Apesar do custo elevado destes equipamentos, a informação que fornecem permite identificar e corrigir problemas de torção de forma inequívoca. Sendo possível, é boa prática executar uma “campanha de espiral” após a execução duma nova instalação inclinométrica.

A torção das calhas inclinométricas não é um erro de medição, devendo-se normalmente a procedimentos errados de execução da instalação inclinométrica (in ex.: reorientação forçada do tubo – 3.4.5 – ou compressão do mesmo durante a execução do bolbo de selagem – 3.4.6) ou de acondicionamento dos tubos inclinométricos (3.2.1).

#### 6.4.7. Erros sistemáticos pontuais

Os erros sistemáticos pontuais caracterizam-se por pares de leituras em secções de tubo isoladas, ou numa porção de tubo limitada, cujas somas ultrapassam os limites de confiança definidos (in ex.: Figura 78, 6.3.3). As causas para este tipo de ocorrência incluem:

- diferenças no posicionamento da sonda entre os dois sentidos de leitura;
- existência de detritos nas calhas de rotação do tubo ou nas rodas do instrumento;
- manutenção deficiente das rodas do instrumento;
- uniões de troços de tubo mal executadas, danificadas ou deformadas;
- uniões telescópicas que sofrem assentamentos;
- deformações localizadas que influenciam o posicionamento das rodas da sonda.

Os erros sistemáticos pontuais podem ter, ou não, impacto significativo nos resultados inclinométricos. Essa influência dependerá sempre da magnitude, da repetibilidade e da profundidade da ocorrência<sup>1</sup>. Por isso, não se considera sensato proceder à correção de todo e qualquer erro pontual existente. Anteriormente à aplicação de qualquer tipo de correção, a relevância do erro deve ser avaliada ao nível dos resultados e no contexto da exigência requerida.

Coimbra (2011) apresenta uma metodologia de correção de somas ( $S_i$ ) sem que os valores de medição respetivos sejam afetados. Este método de correção, designado por compensação equitativa, baseia-se na adição de um determinado valor ( $x_i$ ) a ambas as leituras da secção afetada ( $l_i$ ), de forma a mover a soma para dentro dos limites de confiança:

$$(l_i^0 + x_i) + (l_i^{180} + x_i) \cong \mu \Leftrightarrow x_i \cong (\mu - S_i)/2 \quad (117)$$

Este conceito é útil mediante certos erros pontuais que têm um grande impacto no desvio padrão das somas, mas não são significativos para os deslocamentos inclinométricos. Na Figura 92 apresenta-se um exemplo que ocorre com alguma frequência. Os picos de somas apresentados coincidem com uma união entre secções de tubo que contêm algum espaçamento entre si. Devido à disposição oblíqua dos pares de rodas da sonda (Figura 38, 4.3.1), uma fica posicionada entre secções (in ex.: na união) e outra numa das secções de tubo, sendo este processo invertido no sentido oposto. No caso da Figura 92, os erros não têm impacto porque ocorrem em ambos os pares de rodas e assumem dois valores aproximadamente simétricos em duas profundidades contíguas. Este tipo de fenómeno é normalmente repetível e, por isso, raramente tem significado, mesmo quando se verifica apenas um pico num sentido. Contudo, há também situações que ocorrem esporadicamente e que assumem maior relevância nas curvas de deslocamento, mediante as quais há vantagem em proceder à correção efetiva das medições afetadas por aqueles erros.

---

<sup>1</sup> Obviamente, erros maiores, com menor repetibilidade e a profundidades superiores serão mais gravosos.



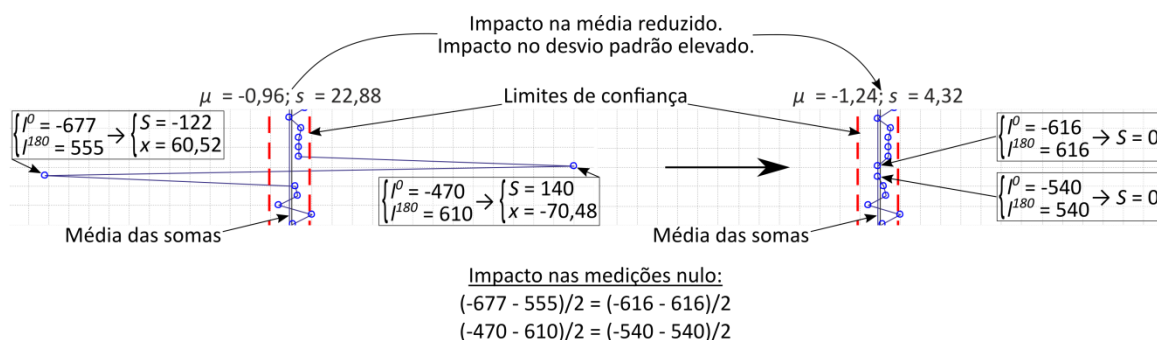


Figura 92 – Correção de somas desviantes por compensação equitativa (adaptado de Coimbra, 2011).

A avaliação do impacto que os erros sistemáticos pontuais têm em deslocamentos nem sempre é fácil, nem direta, sendo preferível estimar a perturbação através das somas das leituras. Embora não se conheçam procedimentos de quantificação e correção deste tipo de erro, o autor deste documento desenvolveu algumas metodologias no Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC). Apresentam-se de seguida alguns destes métodos.

Sabendo-se que os perfis de somas de leituras refletem o erro de medição em torno do dobro do desvio na origem ((84), 6.3.1) e conhecendo-se o erro típico do sistema (6.2), permitindo este estabelecer limites de confiança para aqueles perfis (6.3.3), o erro de medição é proporcional ao desvio da soma relativamente à média  $\mu$ , desde que esse desvio seja superior ao intervalo de confiança estabelecido (in ex.: erro aleatório típico; Quadro 20, 6.2.1).

Observando a equação (81) (6.3.1), verifica-se que o erro sistemático transferido para a medição corresponde à média dos erros sistemáticos ocorridos nas leituras  $l^0$  e  $l^{180}$ . Portanto, a magnitude do erro sistemático produzido ( $\varepsilon_{s,i}$ ) corresponde aproximadamente<sup>1,2</sup> a metade da diferença entre a soma respetiva ( $S_i$ ) e a média das somas ( $\mu$ ):

$$|\varepsilon_{s,i}| \cong |S_i - \mu|/2 \quad (118)$$

No entanto, os perfis de somas não permitem a identificação do sentido a corrigir. Por um lado, qualquer leitura pode afetar a respetiva soma no sentido positivo ou negativo; por outro lado, uma soma desviante em determinado sentido pode produzir um deslocamento positivo ou negativo. Mesmo sendo possível determinar o sentido do erro através dos deslocamentos incrementais, esse procedimento só é válido em zonas da instalação estáveis ou de comportamento conhecido, havendo ainda a necessidade de determinar a leitura a corrigir por tentativa e erro. Por esta razão desenvolveram-se os procedimentos de análise e correção descritos na secção 6.4.2.

Os procedimentos descritos em 6.4.2 são diretamente aplicáveis nestas situações. Contudo, nes-

<sup>1</sup> Note-se que há sempre a variabilidade aleatória associada a esta definição. Outra forma, mais conservativa, de estimar  $\varepsilon_{s,i}$  será pela diferença entre  $S_i$  e o limite de confiança mais próximo.

<sup>2</sup> Note-se que a equação (118) pressupõe a existência de erro apenas num sentido (in ex.:  $l^0$  ou  $l^{180}$ ). A ocorrência de erro em ambos os sentidos só poderá ser avaliada pelas equações (94) ou (99) (6.4.2).

tes casos, por uma questão de simplicidade, será preferível aplicar os mesmos princípios entre secções de tubo contíguas. Reescrevendo-se a equação (90) (6.4.2) neste sentido:

$$\begin{cases} l_{i+1}^0 - l_i^0 = \Delta l_i^0 \pm \sqrt{2}\varepsilon'_a + 2\varepsilon'_{s,i} \\ l_{i+1}^{180} - l_i^{180} = \Delta l_i^{180} \pm \sqrt{2}\varepsilon'_a + 2\varepsilon'^{180}_{s,i} \end{cases} \quad (119)$$

sendo  $\Delta l_i$  o diferencial entre leituras, inclinações ou desvios da vertical, em cada sentido.

Sabendo-se que  $\Delta l_i^0 = -\Delta l_i^{180}$  e que  $\varepsilon'_a = \varepsilon_a/\sqrt{2}$  ((82), 6.3.1), a identificação e quantificação do erro podem fazer-se reescrevendo a equação (93) (6.4.2):

$$\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}}\varepsilon_a + 2(\varepsilon'^0_{s,i} + \varepsilon'^{180}_{s,i}) \quad (120)$$

Uma evidência muito clara de que existe um erro significativo é a ocorrência de duas secções contíguas com  $|\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180}| > \left| \frac{2}{\sqrt{2}}\varepsilon_a \right|$  (in ex.: acima e abaixo da secção afetada).

A correção do sentido afetado pode fazer-se através da equação (121), onde  $l_{c,p,i}$  é a leitura corrigida da campanha  $p$  na secção  $i$ :

$$\mu_p \cong l_{p,i}^0 + l_{p,i}^{180} \Rightarrow \begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases} \quad (121)$$

O sentido a corrigir corresponde frequentemente ao maior valor absoluto de  $\Delta l_i$ , havendo uma indicação clara desta regra quando este se verifica no mesmo sentido em ambas as somas de diferenciais que envolvem aquela secção. Não obstante, a correção deverá ser validada por julgamento técnico. Quando o erro ocorre em zonas geotecnicaamente estáveis, a validação pode fazer-se por observação do efeito produzido nos deslocamentos incrementais. Caso a ocorrência se dê numa zona de instabilidade, será necessário avaliar a correção de forma contextual, considerando o comportamento de obra expectável e os resultados de outros dispositivos de observação.

Nas figuras 77 e 78 (6.3.3) demonstra-se a relação direta entre desvios de somas de leituras relativamente a  $\mu$  e a ocorrência de deslocamentos. Na secção 6.4.2 apresentam-se os casos das campanhas 49 e 49R, demonstrando-se que incorporam erros de alteração do desvio na origem. Na Figura 93 apresentam-se os casos das campanhas 45 e 51, onde se verifica a ocorrência de erros pontuais. Na mesma figura apresentam-se os perfis de somas corrigidos, identificados pelo sufixo “corr”. De acordo com a equação (118), a estimativa do erro pontual na campanha 45 é de 1,22 mm, sendo o deslocamento incremental à mesma profundidade de 1,12 mm. Para a campanha 51, os erros estimados nas três profundidades assinaladas, no sentido descendente, são de 0,58, 0,57 e 0,53 mm, sendo os deslocamentos incrementais correspondentes de -0,57, -0,44 e -0,64 mm. Com base no maior valor de  $|\Delta l_i|$  ((119), (120)), os sentidos corrigidos são B0 na campanha 45 e B180 na campanha 51. No Anexo XI descrevem-se os procedimentos aplicados.

Na Figura 94 apresentam-se as curvas corrigidas e não corrigidas de deslocamento acumulado das campanhas 45 e 51, juntamente com as curvas homólogas das campanhas 45R e 50. Observando-se esta figura e considerando-se a semelhança entre os valores dos erros estimados e dos deslocamentos incrementais respetivos, conclui-se que este método é adequado para a correção deste tipo de ocorrências e que potencia tanto o aproveitamento de resultados dúbios como a redução da execução de campanhas complementares de verificação.

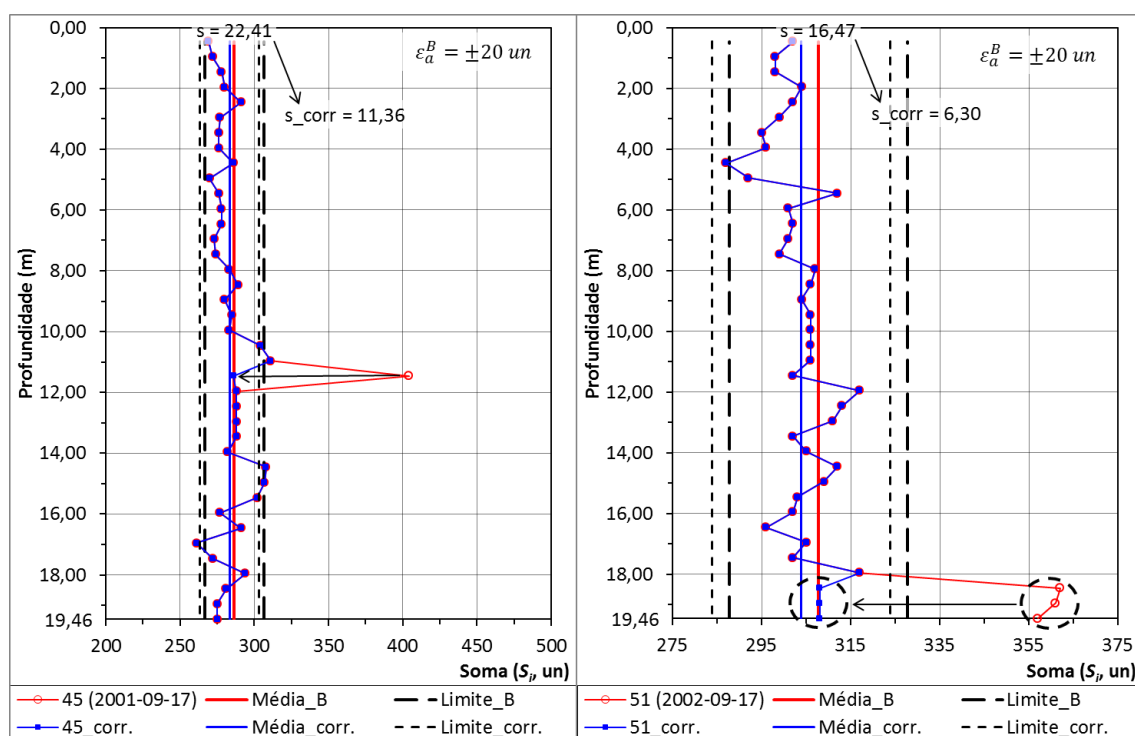


Figura 93 – Somas de leituras das campanhas 45 e 51 na direção *B* (figuras 77 e 78, 6.3.3), pré e pós correção de erros pontuais através da média das somas.

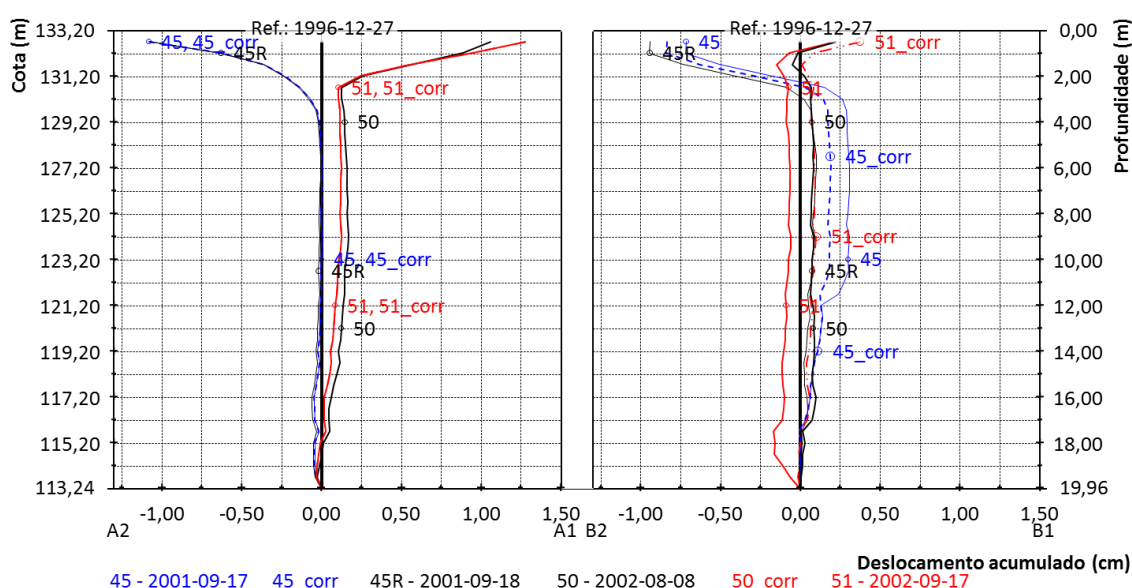


Figura 94 – Deslocamentos acumulados das campanhas 45, 45R, 50 e 51 nas direções *A* e *B* (figuras 77 e 78, 6.3.3), pré e pós correção de erros pontuais nas campanhas 45 e 50 através da média das somas.

Perante a existência de vários erros pontuais e sequenciais na mesma campanha, este método de correção (in ex.: entre secções contíguas) tem duas dificuldades evidentes:

- a) a identificação do sentido a corrigir pelo maior valor absoluto de  $\Delta l_i$  torna-se inviável na presença de 3 ou mais erros sequenciais;
- b) a presença de vários erros pontuais expressivos pode afetar o valor da média das somas das leituras e consequentemente a estimativa do erro.

O ponto a) pode contornar-se por aplicação dos métodos de análise descritos em 6.4.2 (in ex.: entre campanhas). Outra opção será aplicar a metodologia aqui apresentada iterativamente<sup>1,2</sup>.

O ponto b) requer que a média das somas seja recalculada com exclusão de extremos, designadamente os percentis caudais correspondentes a 5 – 10% da distribuição de somas (6.5.1).

Na Figura 95 apresenta-se um caso de estudo que envolve dois instrumentos e uma instalação cujas calhas da direção *B* terão, provavelmente, detritos ligados ao tubo ou deformações localizadas<sup>3</sup>. Todas as campanhas foram executadas na mesma data, pelo que se dispõe de um bom perfil de referência (campanhas 23 e 23R). Devido à quantidade e à magnitude dos erros, a média das somas foi recalculada com exclusão do percentil 0,1 da distribuição respetiva (Anexo XI). Procede-se à análise dos dados através dos procedimentos descritos nesta secção e em 6.4.2, tendo-se corrigido 6 leituras pertencentes ao percentil excluído. Os procedimentos de análise e correção foram (Figura 95b):

- A curva 23-I foi analisada entre secções com identificação iterativa do sentido a corrigir<sup>4</sup>. A correção fez-se através da média das somas, de acordo com a equação (121).
- A curva 23-C1 foi analisada entre campanhas com identificação do sentido a corrigir pela equação (94)<sup>5</sup>. A correção fez-se por subtração dos resultados da equação (93) exteriores ao intervalo de confiança estabelecido<sup>6</sup>.
- A curva 23-C2 foi analisada da mesma forma que a curva 23-C1. A correção fez-se através da equação (99)<sup>5</sup> substituindo  $\bar{\Delta l}$  por  $\Delta l_i$ .
- A curva 23-C3 foi analisada da mesma forma que as curvas 23-C1 e 23-C2. A correção fez-se em ambos os sentidos por subtração dos resultados da equação (94)<sup>5</sup> exteriores ao intervalo de confiança estabelecido.

---

<sup>1</sup> Na primeira iteração o sentido a corrigir identifica-se pelo diferencial entre uma secção afetada e outra não afetada. Nas iterações seguintes a identificação faz-se pelo diferencial entre a secção corrigida na iteração anterior e a secção seguinte.

<sup>2</sup> Note-se que o método iterativo aplica-se apenas à identificação do sentido a corrigir. A correção faz-se através da média das somas ((121)), pelo que não há empolamento do erro entre as secções corrigidas (6.5.2).

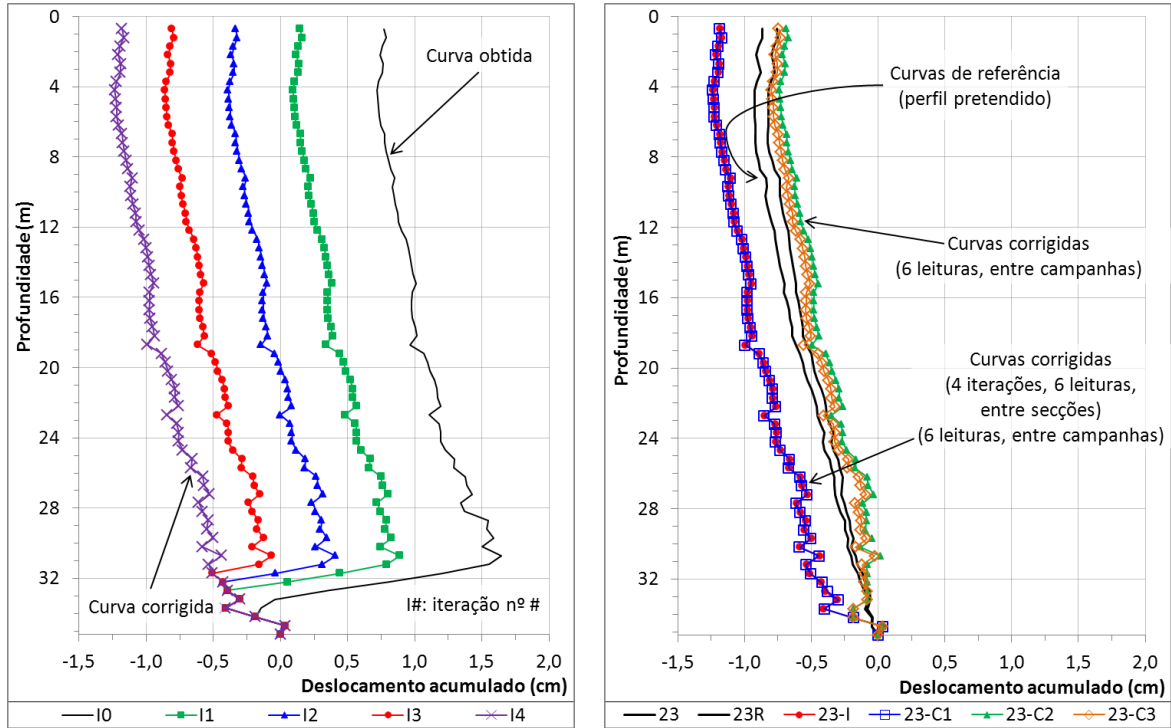
<sup>3</sup> Perante a necessidade de execução duma campanha diretamente nas calhas da direção *B* verificou-se a ocorrência de erros muito expressivos nessa direção. A experiência foi repetida com outro inclinómetro e a incoerência dos resultados manteve-se (Anexo XI).

<sup>4</sup> Aplicação das equações (118) e (119) com correção do sentido com maior valor de  $|\Delta l_i|$ .

<sup>5</sup> Esta prática só é aceitável em zonas assumidamente estáveis.

<sup>6</sup> Aplicação da equação (100) substituindo  $\bar{\Delta l}$  por  $\Delta l_i$ .

Na Figura 95a apresenta-se a curva de deslocamento obtida juntamente com o progresso da correção da curva 23-I. Apesar da magnitude dos erros na porção inferior do tubo, constata-se que a correção das leituras através da média das somas melhora substancialmente o resultado (Figura 95b). Verifica-se também que o maior valor absoluto de  $\Delta l_i$  corresponde ao sentido a corrigir.



a) Progresso da correção por iteração.

b) Curvas corrigidas e pretendidas.

Figura 95 – Correção de leituras pertencentes ao percentil 0,1 da distribuição de somas. Comparação de resultados obtidos com diferentes métodos de análise e de correção.

Na Figura 95b observam-se as curvas de deslocamento pretendidas juntamente com as curvas homólogas corrigidas pelos quatro métodos acima descritos. São evidentes algumas observações:

- i. a correção com base na média das somas ((121); 23-I) equivale à da equação (100) (23-C1);
- ii. a correção com base na equação (99) (23-C2) corresponde aproximadamente à correção de ambos os sentidos ((94); 23-C3);
- iii. as curvas 23-C2 e 23-C3 apresentam resultados mais próximos aos das curvas de referência.

Relativamente ao ponto *i*, se for considerada a substituição de  $\bar{\Delta l}$  por  $\Delta l_i$  na equação (100), esta toma o valor da expressão (121):

$$\begin{cases} \mu \cong l^0 + l^{180} \\ \Delta\mu \cong \Delta l^0 + \Delta l^{180} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} l^0 + l^{180} - \mu \cong 0 \\ \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \cong 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} l^0 \cong \mu - l^{180} \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 \\ l^0 + l^{180} - \mu \cong \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} l^0 \cong \mu - l^{180} \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 \\ l^0 \cong \mu - l^{180} + \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \wedge l^{180} \cong \mu - l^0 + \Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta\mu \end{cases} \quad (122)$$

sendo  $l^0$  e  $l^{180}$  os valores das leituras obtidas com erro incluso. Tal como expresso na equação

(100), a eliminação desse erro impõe a subtração de  $\Delta l^0 + \Delta l^{180} - \Delta \mu$  ao valor da leitura.

Relativamente ao ponto *ii*, a similitude das curvas 23-C2 e 23-C3 advém do facto de ambas considerarem os erros dos sentidos  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Na verdade, os métodos são idênticos:

- Na equação (99) pretende-se corrigir o sentido que apresente o erro de maior magnitude (in ex.: curva 23-C2). Considere-se que o sentido a corrigir é  $0^\circ$ :

$$l_{c,i}^0 = l_i^0 - (\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}) = l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} \Rightarrow d_{c,i} = L \frac{l_{c,i}^0 - l_i^{180}}{2k} = L \frac{l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - l_i^{180}}{2k} \quad (123)$$

- Na correção da curva 23-C3 subtrai-se o resultado da equação (94) a ambos os sentidos:

$$\begin{cases} l_{c,i}^0 = l_i^0 - (\Delta l_i^0 - \Delta b) = l_i^0 - \Delta l_i^0 + \Delta b \\ l_{c,i}^{180} = l_i^{180} - (\Delta l_i^{180} - \Delta b) = l_i^{180} - \Delta l_i^{180} + \Delta b \end{cases} \Rightarrow d_{c,i} = L \frac{l_{c,i}^0 - l_{c,i}^{180}}{2k} = L \frac{l_i^0 - \Delta l_i^0 - l_i^{180} + \Delta l_i^{180} + \Delta b - \Delta b}{2k} \quad (124)$$

Relativamente ao ponto *iii*, importa considerar o seguinte:

- os métodos de correção aplicados às curvas 23-C2 e 23-C3 só são válidos em zonas geotecnicamente estáveis, uma vez que se parte do princípio que  $\Delta d_i^0 = \Delta d_i^{180} = 0$  (6.4.2);
- neste caso particular os erros verificam-se em ambos os sentidos de medição, principalmente na leitura  $3^1$ . De facto, os quatro métodos de correção teriam resultados muito próximos se os erros verificados afetassem apenas um sentido;
- a ocorrência de erros de medição em ambos os sentidos não é comum. Neste caso, suspeita-se que a sonda terá desencalhado, circulado desencalhada durante a zona afetada, e voltado a encalhar durante o percurso restante (Anexo XI). Portanto, os métodos de correção aplicados às curvas 23-I e 23-C1 consideram-se adequados à generalidade das situações;

## 6.5. Estimativa do erro em curvas de perfil

### 6.5.1. Procedimentos gerais de cálculo

Na secção 6.2 introduz-se o cálculo do erro típico do sistema e a sua repercussão em profundidade e entre campanhas. O erro nos deslocamentos incrementais e acumulados é normalmente estimado pelas equações (75) e (76), respetivamente, havendo necessidade de recorrer às equações (78) e (79) no caso de existir mais de uma referência. A componente aleatória do erro na direção *B* pode considerar-se o dobro do valor homólogo na direção *A* ou estimar-se pela equação (77).

De uma forma simplista, a componente aleatória do erro associado a uma curva de perfil corresponde ao valor do desvio padrão das somas ((86), 6.3.3) multiplicado por  $\sqrt{n}$ , sendo *n* o número de medições. Esta prática é válida para curvas de desvio e de deslocamento<sup>2</sup>, mas não considera a existência de erros sistemáticos.

<sup>1</sup> Quarto ponto no sentido ascendente da Figura 95.

<sup>2</sup> A prática é válida para curvas de deslocamento porque a campanha de referência constitui um padrão. Havendo várias campanhas de referência envolvidas no cálculo, a componente aleatória de cada campanha transitória deve ser considerada ((78), (79), 6.2.2).

A estimativa do erro em curvas de perfil com reconhecimento de erros sistemáticos requer o cálculo de  $s$  e de  $\mu$  com exclusão das somas de leituras desviantes. Os procedimentos de aplicação podem resumir-se da seguinte forma:

1. identificação das somas de leituras exteriores ao intervalo de confiança correspondente à componente aleatória do erro típico do sistema inclinométrico;
2. cálculo de  $s$  e de  $\mu$  com exclusão das somas identificadas no ponto 1;
3. estimativa dos erros sistemáticos com base na equação (118) (6.4.7), considerando o valor de  $\mu$  calculado no ponto 2;
4. estimativa do erro com base na equação (75), (76), (79) ou (80), considerando o valor de  $s$  determinado no ponto 2 ( $\varepsilon_a$ ) e os erros sistemáticos determinados do ponto 3 ( $\varepsilon_{s,i}$ ).

Alternativamente pode considerar-se a componente aleatória do erro típico em vez de  $s$  no ponto 4. Desta forma, considera-se sempre a mesma componente aleatória, o que facilita a comparação entre estimativas de campanhas com dispersões distintas.

Há situações que exigem abordagens ligeiramente diferentes, como sejam:

- a) instalações com dispersões atipicamente elevadas (in ex.: superiores ao erro típico);
- b) erros sistemáticos muito expressivos que afetam o valor da média das somas das leituras.

De um modo geral, a ocorrência a) deve-se a deficiências da instalação inclinométrica. A aplicação dos procedimentos descritos resulta na identificação de um número elevado de erros sistemáticos e em estimativas de erro in comportáveis. Assim, a distinção entre a variabilidade natural destas instalações e a ocorrência de erros sistemáticos deve fazer-se por análise da dispersão das medições de cada secção. Ou seja, no sentido de eliminar as incertezas associadas aos movimentos do terreno, executam-se várias campanhas em cada serviço e utiliza-se a média das medições obtidas para efeitos de análise geotécnica. Desta forma, a componente aleatória do erro típico da instalação corresponde à dispersão média das campanhas executadas em determinada data<sup>1</sup>:

$$\bar{s} = \sqrt{\frac{\sum s_i^2}{m}} \quad (125)$$

onde  $m$  é o número de campanhas e  $s_i$  é a dispersão das somas das leituras de cada campanha.

A ocorrência b) equivale ao caso de estudo apresentado na Figura 95 (6.4.7), onde a estimativa de  $s$  e de  $\mu$  requereu a eliminação do percentil 0,1 da distribuição de somas. Nestes casos é difícil definir o conjunto de somas a excluir para efeitos do cálculo de  $s$ , de  $\mu$  e das estimativas de erro que

<sup>1</sup> Note-se que  $\bar{s}$  é um indicador enviesado. Há outras formas de cálculo que não são abordadas neste documento. Neste caso, a equação (125) deriva da equação  $s = \sqrt{\sum [n_i(s_i^2 + (\mu_i - \bar{\mu})^2)] / \sum n_i}$ , onde  $n_i$  é o número de leituras de cada campanha,  $s_i$  e  $\mu_i$  são a dispersão e a média das somas de cada campanha, respetivamente, e  $\bar{\mu}$  é a média dos valores  $\mu_i$ . Partindo-se do princípio que todas as campanhas têm o mesmo número de leituras (in ex.:  $\{n_i\} = n$ ;  $\sum n_i = mn$ ) e que não há alterações significativas do valor de  $\mu_i$  (in ex.:  $\mu_i - \bar{\mu} \cong 0$ ), esta expressão toma a forma da equação (125).

daí decorrem. Embora seja preferível repetir este tipo de campanhas, a decisão sobre o conjunto de somas a excluir para efeitos de análise qualitativa pode fazer-se da seguinte forma:

1. cálculo dos percentis 0,05 e 0,95 da distribuição de somas de leituras<sup>1</sup>;
2. cálculo das diferenças  $|S^P - \mu|$ , onde  $P$  é o percentil da distribuição de somas de leituras determinado no ponto 1;
3. exclusão das leituras pertencentes ao percentil  $P$  mediante a condição  $|S^P - \mu| > \varepsilon_a$ .

No Quadro 22 apresentam-se as estimativas de erro para as curvas de perfil das campanhas 45 e 51 (figuras 77 e 78acd, 6.3.3). No mesmo quadro apresentam-se os valores homólogos do erro típico daquele sistema inclinométrico, com e sem contribuição do erro sistemático. Os procedimentos de cálculo encontram-se descritos com maior pormenor no Anexo XII.

A observação dos Quadro 22 permite concluir:

- Em termos percentuais, a componente aleatória utilizada para efeitos de estimativa do erro tem um impacto significativo nos valores obtidos<sup>2</sup>. Embora a magnitude dos valores seja pequena para ambas as componentes aleatórias, esta conclusão demonstra que a utilização de  $s$  pode tornar-se vantajosa em instalações com profundidade elevada.
- Ambas as campanhas exibem erros sistemáticos nas duas direções, mas, se o erro aleatório típico for comparado com o estimado, apenas os erros da direção  $B$  têm relevância.
- Apesar da magnitude dos erros verificados na direção  $B$ , as estimativas obtidas são inferiores ao erro típico do sistema quando este inclui a componente sistemática. Sob esta perspetiva, a necessidade de correção depende do nível de exigência necessário.

Quadro 22 – Erro típico e erro estimado para as curvas de perfis acumulados das campanhas 45 e 51 (figuras 77 e 78acd, 6.3.3), cuja instalação tem cerca de 19,50 m de profundidade (39 secções).

Tipo de cálculo	Desvios/deslocamentos acumulados da campanha 45		Desvios/deslocamentos acumulados da campanha 51	
	Direção A	Direção B	Direção A	Direção B
Estimativa com $\varepsilon_a$ típico	$\pm 1,49 \text{ mm}$	$\pm 4,74 \text{ mm}$	$\pm 1,52 \text{ mm}$	$\pm 4,35 \text{ mm}$
Estimativa com $\varepsilon_a$ baseado em $s$	$\pm 0,76 \text{ mm}$	$\pm 3,30 \text{ mm}$	$\pm 0,87 \text{ mm}$	$\pm 2,59 \text{ mm}$
<b>Valores típicos para 39 secções</b>	<b>Direção A</b>		<b>Direção B</b>	
Erro típico (apenas $\varepsilon_a$ )	$\pm 1,25 \text{ mm}$		$\pm 2,50 \text{ mm}$	
Erro típico ( $\varepsilon_a$ e $\varepsilon_s$ )	$\pm 5,15 \text{ mm}$		$\pm 6,40 \text{ mm}$	

<sup>1</sup> Eventualmente podem-se também analisar os percentis 0,1 e 0,9 para verificação da condição do ponto 3. Não se recomenda a análise de percentis mais abrangentes, devendo optar-se pela eliminação do menor número de somas necessário à tomada de decisão.

<sup>2</sup> Obtêm-se intervalos de confiança inferiores para  $\varepsilon_a = s$ .



### 6.5.2. Influência dos procedimentos de correção na estimativa do erro em curvas de perfil

Tratando-se da correção de leituras, uma forma simples de avaliar a influência que os procedimentos corretivos têm na estimativa do erro em curvas de perfil seria comparar estimativas pré e pós correção, seguindo os procedimentos indicados na secção anterior. No entanto, as somas de leituras corrigidas nem sempre exprimem corretamente o erro de medição, designadamente quando a correção se faz em função do valor do desvio na origem. Portanto, convém avaliar numericamente essa influência para se compreender a diferença entre diferentes metodologias de correção. Neste sentido, procede-se à estimativa do erro introduzido nos desvios incrementais por correção de erros sistemáticos pontuais (6.4.7). As estimativas de erro decorrentes dos procedimentos apresentados nas secções 6.4.2 a 6.4.5 não serão abordadas, uma vez que aquelas correções beneficiam sempre a qualidade dos resultados<sup>1</sup> e podem introduzir alguma complexidade na estimativa do erro.

Conforme apresentado em 6.3.1, o erro numa medição pode exprimir-se através do erro da soma de leituras respetiva. Assim, a estimativa do erro numa medição corrigida pode fazer-se em função da estimativa do erro numa soma corrigida:

$$S_{c,i} = l_{c,i} + l_i \Rightarrow \varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_{c,i}) + \varepsilon^2(l_i)} \quad (126)$$

onde  $S_{c,i}$  é a soma de leituras corrigida,  $l_{c,i}$  é uma leitura corrigida e  $l_i$  é uma leitura não corrigida, sendo  $\varepsilon(l_i) = \varepsilon'_a = \varepsilon_a/\sqrt{2}$ .

Na secção 6.4.7 exemplifica-se a correção de erros sistemáticos pontuais através das equações:

- a) (94): aplicada a ambas as leituras da secção a corrigir para eliminar o erro presente em ambos os sentidos. Baseia-se na análise das componentes de deslocamento e produz resultados equivalentes aos da equação (99).
- b) (121): aplicada apenas à leitura correspondente ao sentido onde o erro é identificado. Baseia-se na análise das componentes de diferencial entre desvios de secções contíguas e produz resultados equivalentes aos da equação (100).
- c) (99): aplicada apenas à leitura correspondente ao sentido onde o erro é identificado, mas com efeitos corretivos em ambos os sentidos. Baseia-se na análise das componentes de deslocamento e produz resultados equivalentes aos da equação (94).
- d) (100): aplicada apenas à leitura correspondente ao sentido onde o erro é identificado. Baseia-se na análise das componentes de deslocamento e produz resultados equivalentes aos da equação (121).

---

<sup>1</sup> Devido à magnitude que aqueles tipos de erro normalmente assumem, as curvas de perfil respetivas só têm significado depois de corrigidas. Logo, os erros introduzidos pelos processos de correção serão sempre inferiores aos erros presentes nos dados inclinométricos.

Os casos *a)* e *c)* são matematicamente equivalentes ((123), (124), 6.4.7) e resultam na mesma expressão de cálculo duma medição. Considere-se o caso *c)*, cujo erro afeto a uma leitura corrigida tem as seguintes componentes:

$$l_{c,i} = l_i \pm (\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}) \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta l_i)} = \sqrt{\frac{5}{2}}\varepsilon_a \quad (127)$$

com  $\varepsilon(l_i) = \varepsilon_a/\sqrt{2}$  e  $\varepsilon(\Delta l_i) = \sqrt{2}\varepsilon(l_i) = \varepsilon_a$ .

Assim, de acordo com a expressão (126), o erro de medição corresponde a:

$$\varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{5}{2}}\varepsilon_a\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{3}\varepsilon_a \quad (128)$$

No caso *b)* identificam-se as seguintes componentes no erro afeto a uma leitura corrigida:

$$l_{c,i} = \mu - l_i \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(\mu) + \varepsilon^2(l_i)} = \sqrt{s^2 + \frac{\varepsilon_a^2}{2}} \quad (129)$$

com  $\varepsilon(\mu) = s$  e  $\varepsilon(l_i) = \varepsilon_a/\sqrt{2}$ .

Então, o erro de medição corresponde a ((126)):

$$\varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{s^2 + \frac{\varepsilon_a^2}{2}}\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{s^2 + \varepsilon_a^2} \cong \sqrt{2}\varepsilon_a; s \cong \varepsilon_a \quad (130)$$

No caso *d)* identificam-se as componentes seguintes no erro de uma leitura corrigida:

$$\begin{aligned} l_{c,i} &= l_i - (\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b) \Rightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\varepsilon^2(l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta l_i) + 2\varepsilon^2(\Delta b)} \Leftrightarrow \\ &\Leftrightarrow \varepsilon(l_{c,i}) = \sqrt{\frac{5}{2}\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2} \end{aligned} \quad (131)$$

com  $\varepsilon(l_i) = \varepsilon_a/\sqrt{2}$ ,  $\varepsilon(\Delta l_i) = \varepsilon_a$  e  $\varepsilon(\Delta b) = \varepsilon\left(\frac{\mu_p - \mu_r}{2}\right) = \sqrt{\frac{1}{2}[\varepsilon^2(\mu_p) + \varepsilon^2(\mu_r)]} = \sqrt{s_p^2 + s_r^2}/\sqrt{2}$ .

Desta forma, o erro de medição corresponde a ((126)):

$$\varepsilon(S_{c,i}) = \sqrt{\left(\sqrt{\frac{5}{2}\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2}\right)^2 + (\varepsilon_a/\sqrt{2})^2} = \sqrt{3\varepsilon_a^2 + s_p^2 + s_r^2} \cong \sqrt{5}\varepsilon_a; \{s_p; s_r\} \cong \varepsilon_a \quad (132)$$

A observação das estimativas apresentadas permite concluir:

- A equação (121) não configura apenas o método de aplicação mais simples, como também representa a menor influência potencialmente introduzida na estimativa do erro. Este método será o mais indicado para grande maioria das situações, excluindo aquelas em que o erro se verifique nos dois sentidos da direção afetada.
- As equações (94) e (99) introduzem um erro potencial ligeiramente superior ao da equação

(121). Esta deve ser a metodologia preferencial para a identificação e a correção de erros de medição que afetem ambos os sentidos. Contudo, importa reter que este método se baseia na presunção de deslocamento nulo, sendo por isso de aplicação restrita a zonas geoteticamente estáveis.

- A aplicação da equação (100) implica a introdução duma incerteza adicional que advém do termo que exprime a magnitude do erro a eliminar (in ex.: diferenciais entre leituras e entre desvios na origem). Não obstante, este método pode constituir a única forma de análise perante a alteração do desvio na origem em zonas instáveis (6.4.2).

No Quadro 23 apresentam-se as estimativas de erro pré (Quadro 22, 6.5.1) e pós (figuras 93 e 94, 6.4.7) correção dos erros verificados na direção *B* das campanhas 45 e 51, considerando-se o valor típico de  $\varepsilon_a$  (Anexo XII). Verifica-se que as correções resultam em menor estimativa de erro, pelo que neste caso é vantajoso aplicar os procedimentos descritos em 6.4.7.

Quadro 23 – Estimativas de erro pré e pós correção de erros sistemáticos pontuais na campanha 45 e 51 (figuras 93 e 94, 6.4.7), cuja instalação tem cerca de 19,50 m de profundidade (39 secções).

Profundidade [m]	Campanha 45: Desvios/deslocamentos na direção B				Profundidade [m]	Campanha 51: Desvios/deslocamentos na direção B			
	Incrementais		Acumulados			Incrementais		Acumulados	
	Antes [mm]	Após [mm]	Antes [mm]	Após [mm]		Antes [mm]	Após [mm]	Antes [mm]	Após [mm]
11,46	±1,62	±0,57	±3,59	±2,42	18,46	±0,98	±0,57	±2,37	±0,98
					18,96	±0,97	±0,57	±1,67	±0,80
					19,46	±0,93	±0,57	±0,93	±0,57
Total	-	-	±4,74	±3,78	Total	-	-	±4,35	±2,59

## 7. TRABALHO FUTURO

### 7.1. Constituição de base dados geral das campanhas de observação inclinométrica detidas pelo Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

Propõe-se a constituição de uma base de dados com todas as medições inclinométricas do DG/LNEC. A existência de um repositório geral permitirá o acesso fácil e discriminado a todos os dados para efeitos de análise operacional e de investigação. Referem-se alguns exemplos do benefício que este tipo de estrutura poderá proporcionar:

- rastreamento do comportamento metrológico de cada instrumento com base na análise agrupada da totalidade dos dados respetivos;
- análise discriminada de cada obra com a identificação de eventuais alterações instrumentais que tenham ocorrido sem a devida documentação;
- verificação dos limites de confiança aplicados à análise qualitativa de dados e/ou à estimativa do erro de medição, fundamentada com um volume de dados muito substancial e baseada nos procedimentos operacionais próprios da instituição;
- cruzamento de determinados padrões comportamentais com características específicas dos terrenos interessados e/ou das próprias instalações.

Atualmente encontra-se constituída uma base dados experimental com mais de 800.000 registos inclinométricos distribuídos por 43 obras e 511 instalações. A base de dados foi concebida para ser manipulada em  $R^1$ , onde também se desenvolveram alguns algoritmos de categorização da informação. Numa segunda fase, esta base de dados poderia ser complementada com dados observacionais de outros dispositivos instrumentais, ou com outro tipo de informação, e proporcionar a análise integrada de toda a informação disponível.

### 7.2. Otimização do aparato de verificação inclinométrica do Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC)

Tal como referido nos anexos III e IV, o aparato de verificação inclinométrica do NGUT foi substancialmente melhorado. No entanto, a amplitude de medição foi muito reduzida e o sistema de fixação ainda carece de estabilidade. Portanto, propõe-se a otimização do aparato no sentido de lhe conferir maior estabilidade e maior amplitude de medição (in ex.: até  $\pm 15^\circ$ ).

Este aparato é da maior importância para a verificação periódica dos instrumentos inclinométricos e para a clarificação de questões relacionadas com a sensibilidade dos mesmos ou com diferenciais de alinhamento axial dos acelerómetros de instrumentos distintos. Por esta razão, consi-

---

<sup>1</sup> Linguagem de programação dedicada à computação estatística (in: <https://www.r-project.org/about.html>, visitado em 2019-04-24).

dera-se que seria vantajosa a remodelação integral do aparato, incluindo o design funcional e a qualidade dos materiais utilizados.

### **7.3. Otimização da estimativa do tempo de vida útil das instalações inclinométricas com base nos valores de distorção do tubo inclinométrico**

Propõe-se um estudo mais alargado sobre a aplicabilidade dos procedimentos apresentados na secção 5.8.3, mais concretamente no sentido de:

- demonstrar mais claramente a viabilidade e a eficácia daqueles métodos;
- clarificar a diferença entre o uso de valores de distorção do terreno e do tubo para efeitos de previsão da vida útil das instalações;
- otimizar a definição dos limites máximos de distorção, *quicá* o próprio método de cálculo, mediante a introdução de estimativas de curvaturas baseadas nos métodos apresentados na secção 5.9;
- verificação das conclusões tecidas na secção 5.8.3.2, seja pela agregação de casos de obra demonstrativos, seja pela realização dum ensaio laboratorial mais rigoroso.

### **7.4. Avaliação do impacto do erro intrínseco ao método convencional de cálculo na determinação de valores de deslocamento e da respetiva orientação em diversos casos de obra**

Embora se tenha demonstrado que o erro de cálculo intrínseco é inconsequente na gama de inclinações recomendadas, considera-se importante conduzir um estudo que avalie o seu impacto em diversos casos de obra. Por exemplo, o método de cálculo apresentado em 5.10 pode tornar-se vantajoso dependendo:

- da gama de inclinações verdadeiramente praticadas, podendo-se também analisar este parâmetro relativamente a outros, tais como o comprimento, o tipo de terreno e o método de perfuração;
- da inclinação máxima atingida em secções de tubo deformadas, podendo-se também considerar outros parâmetros, tais como o tipo de terreno e a espessura da zona de distorção.

### **7.5. Estudo do impacto da deriva do desvio na origem nas medições inclinométricas a longo prazo**

Em que medida uma deriva do desvio na origem muito elevada pode afetar o erro de medição? Esta é uma questão que ainda não se encontra devidamente esclarecida e que se coloca em instalações com observação de longo prazo cujos instrumentos sejam deficientemente mantidos (in ex.: com períodos de serviço entre calibrações desajustados). Propõe-se um estudo em duas vertentes distintas:

- análise de deslocamentos incrementais e das somas das leituras em zonas assumidamente estáveis, num grupo de instalações previamente selecionado em função da longevidade dos instrumentos utilizados e da magnitude da inclinação nessas zonas;

- análise aprofundada das medições laboratoriais apresentadas no Anexo III (in ex.: tentativa de correção da rotação e comparação de leituras provenientes de instrumentos distintos em cada sentido).

#### **7.6. Estudo aprofundado da ocorrência de erros de rotação e dos métodos de correção correntemente aplicados**

Não é claro que a função seno seja a mais apropriada para descrever o deslocamento introduzido numa direção em função do desvio correspondente na direção ortogonal. Com base na Figura 85 (6.4.3), a função tangente poderá ser mais adequada para descrever aquela relação. Embora os valores obtidos pelas duas funções sejam, em princípio, semelhantes (in ex.: considerando-se a magnitude dos ângulos envolvidos), propõe-se que esta questão seja devidamente estudada através da correlação entre os deslocamentos verificados na direção de menor inclinação e os desvios medidos na direção de maior inclinação. No mesmo estudo pode também considerar-se o diferencial entre as inclinações das duas direções em vez dos valores de desvio.

A origem dos dados poderá constituir-se de três formas distintas:

- seleção de um grupo substancial de instalações onde se reconheça a presença deste tipo de erro, procedendo-se à análise das zonas consideradas estáveis;
- seleção de um grupo de instalações com características de inclinação apropriadas e execução de campanhas de observação com vários instrumentos no mesmo dia, procedendo-se à análise da totalidade das medições;
- conjunto de medições laboratoriais (in ex.: anexos III e IV).

#### **7.7. Estudo alargado da aplicabilidade e da eficiência dos métodos de análise e de correção de dados inclinométricos apresentados nas secções 6.4.2 e 6.4.7**

A fim de confirmar a eficácia e de divulgar as metodologias de análise e de correção de leituras apresentadas nas secções 6.4.2 e 6.4.7, propõe-se a pesquisa de um conjunto substancial de casos de obra onde as mesmas sejam aplicáveis.

#### **7.8. Desenvolvimento de algoritmos de auxílio à comparação topológica de curvas de perfil para efeitos de identificação de erros de rotação e de profundidade**

Nas secções 6.4.3 e 6.4.4 refere-se que os erros de rotação e de profundidade são diagnosticados por comparação topológica (in ex.: padrões de forma) entre curvas de desvio e de deslocamento. No entanto, a interpretação da semelhança entre curvas é completamente subjetiva.

Propõe-se o desenvolvimento de algoritmos capazes produzir indicadores de auxílio ao diagnóstico, de forma a introduzir maior objetividade no processo. Pois, compreendendo-se o mecanismo que produz determinadas transformações topológicas, não será difícil reproduzi-las e produzir um indicador paramétrico.

## 7.9. Desenvolvimento futuro do InclinoReport

Tal como referido em 5.11.3, o InclinoReport foi parcialmente escrito em .NET a fim de interagir com versões modernas do Microsoft Office Excel (MSOE). No entanto, a interação entre o InclinoReport e o MSOE através do .NET tem uma produtividade muito baixa. É importante referir este aspeto pelas seguintes razões:

- a dependência atual do InclinoReport relativamente ao MSOE representa uma perda de produtividade injustificável, pelo que se sugere que esta dissociação seja uma prioridade nos objetivos do Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) (7.9);
- sendo o formato *XLSX* aberto, existem todas as ferramentas necessárias para proceder à dissociação entre o InclinoReport e o MSOE, mantendo o suporte de saída de uma forma transparente (ECMA, 2016a, 2016b, 2015, 2012)<sup>1</sup>;
- embora o processo de implementação direta da normalização acima referida seja de alguma complexidade e exija morosidade, existem ferramentas informáticas de auxílio, tais como o Open XML SDK<sup>2</sup> e o Open XML SDK Tool<sup>3</sup>, entre outras.

Embora a discussão da estrutura do código saia do âmbito deste documento, convém também mencionar certos aspetos que se consideram importantes para efeitos de planeamento futuro:

- embora seja compilado de forma monolítica, o código encontra-se estruturado de forma modular e procedimental com invocações maioritariamente do tipo funcional;
- a separação entre o “código de produção”<sup>4</sup> e a interface gráfica não é muito clara, sendo desejável uma separação mais clara entre as duas partes;
- as variáveis são armazenadas em formato vetorial sem estrutura própria. Embora esta técnica consuma menos memória e resulte em tempos de execução inferiores, a gestão do código torna-se mais difícil à medida que o programa cresce. Seria preferível integrar as variáveis em objetos abstratos com funções de execução predefinidas, até porque a natureza do programa não exige padrões de eficiência especialmente elevados.

Para além da urgência em dissociar o InclinoReport do MSOE (5.11.3), importa também automatizar todas as tarefas manuais que o processamento de dados inclinométricos envolve.

Na Figura 96 ilustra-se o fluxo de trabalho típico do NGUT. Identificam-se algumas ineficiências:

- A recolha de dados, a preparação dos ficheiros respetivos e o seu processamento são processos distintos, quando poderiam fazer parte do mesmo procedimento. Ademais:

---

<sup>1</sup> Note-se que estes documentos têm correspondência com a norma ISO/IEC 29500. Contudo, considera-se preferível uso da norma ECMA-376, uma vez que está livremente disponível e tem um estado de desenvolvimento mais avançado.

<sup>2</sup> Conjunto de bibliotecas que disponibilizam um conjunto de ferramentas de programação direcionadas à criação e manipulação de ficheiros do Microsoft Office (MSO) no formato OOXML, sem necessidade de implementação direta das normas respetivas.

<sup>3</sup> Ferramenta de análise da estrutura interna de ficheiros do MSO no formato OOXML que permite gerar modelos genéricos de código adaptados a cada ficheiro.

<sup>4</sup> Por “código de produção” entenda-se todo aquele que não integra o interface gráfico nem a definição do ambiente de execução em determinada plataforma.

- o Os programas utilizados para recolha de dados e o respetivo formato de armazenamento variam em função do fabricante do instrumento. Seria preferível que este processo fosse uniforme, de forma a padronizar os procedimentos, melhorar a organização da informação e facilitar operações de pesquisa.
- o O processo de criação/atualização dos ficheiros de dados é manual. Dependendo do fabricante do instrumento, pode ainda ser necessário exportar previamente os dados dum formato proprietário para um formato de texto que posteriormente é incluído no ficheiro de dados. Entende-se que estes procedimentos deveriam ser automatizados; pois são desnecessários, pouco produtivos e propensos a erro.
- Embora a equipa técnica esteja atenta a valores díspares de média e de desvio padrão das somas das leituras (6.3), a avaliação qualitativa nem sempre se faz de forma sistemática e objetiva. Ademais:
  - o Quando é objetivo, este processo executa-se sempre após o processamento, exigindo depois novo processamento. Face à baixa eficiência atual do InclinoReport, este segundo passo representa uma perda de tempo muito significativa.
  - o Devido à ausência de ferramentas de análise qualitativa automatizada, este processo tem uma forte componente manual<sup>1</sup>, sendo moroso e de difícil execução.

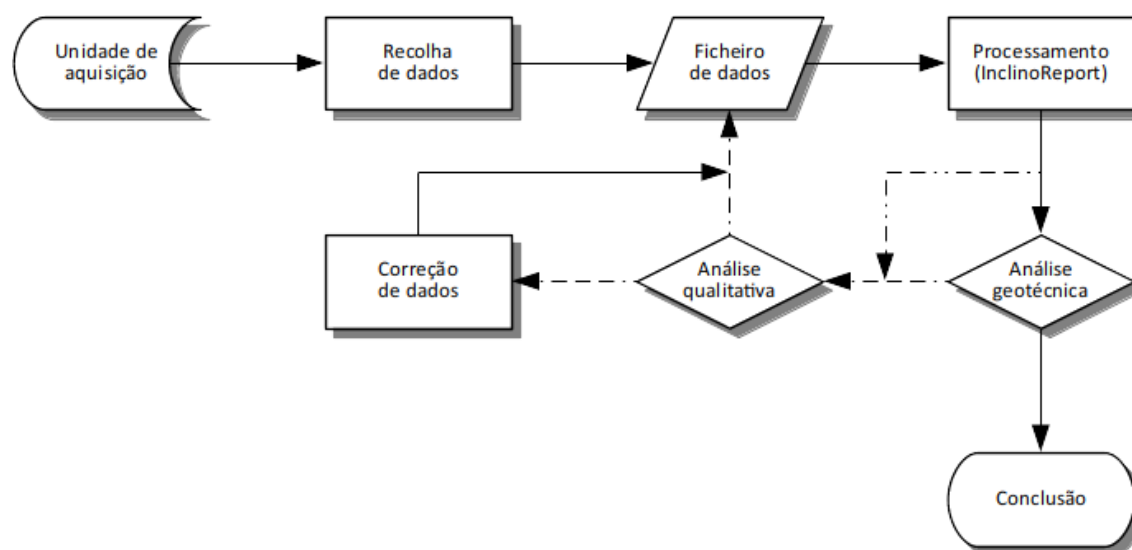


Figura 96 – Fluxo de trabalho mais comum para o processamento de dados inclinométricos no NGUT.

Na Figura 97 apresenta-se o fluxo de trabalho sugerido para eliminar as deficiências acima referidas. As alterações ao InclinoReport requeridas para atingir este objetivo são:

- comunicação direta com as unidades de aquisição;
- capacidade de importação/exportação de dados noutros formatos;
- nova estrutura de dados;
- avaliação dos indicadores de qualidade;

<sup>1</sup> Desenvolveram-se alguns algoritmos em Visual Basic for Applications (VBA) para auxiliar a análise qualitativa de dados. No entanto, estas ferramentas encontram-se num estado de desenvolvimento precoce e não estão incorporadas no InclinoReport.



- identificação e correção de erros de medição<sup>1</sup>;
- pré-visualização de resultados nas formas numérica e gráfica<sup>2</sup>;
- gestão de alterações de profundidade<sup>3</sup>.

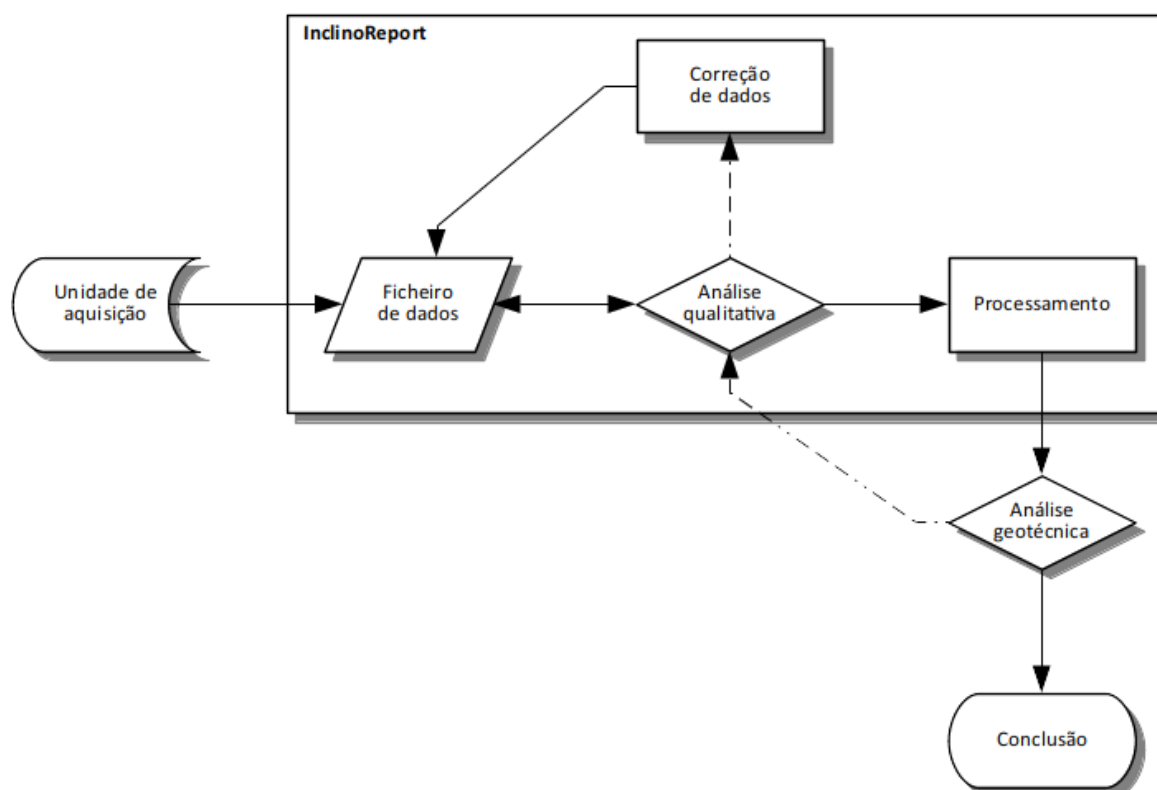


Figura 97 – Fluxo de trabalho sugerido para o processamento de dados inclinométricos no NGUT.

Ao longo dos anos de serviço, as equipas técnicas de campo e de análise de resultados têm referido algumas funcionalidades que ainda não estão implementadas:

- definição personalizada de escalas e de legendas;
- opções de dimensionamento automático de escalas verticais equivalentes às existentes para escalas horizontais<sup>4</sup>;
- avaliação dos indicadores de qualidade (6.3);
- identificação e correção de erros de medição (6.4);
- correção da orientação azimutal das direções *A* e *B* (in ex.: aplicação da equação (102) – 6.4.3 – atribuindo as direções *A* e *B* às coordenadas *y* e *x*, respetivamente);
- possibilidade de produção de gráficos de desvio acumulado de qualquer campanha, inclusivamente a perfilagem de várias campanhas no mesmo gráfico<sup>5</sup>;

<sup>1</sup> Na sequência da implementação da capacidade de correção de erros de rotação (6.4.3), esta funcionalidade permitirá também a correção da orientação azimutal das direções *A* e *B*.

<sup>2</sup> Numa fase inicial, a previsualização de resultados na forma gráfica não é essencial, mas a forma numérica é importante para avaliar a existência de erros e a eficácia das correções aplicadas (6.4).

<sup>3</sup> Esta funcionalidade pode ser incorporada parcialmente, direcionada apenas para situações de lavagem ou assoreamento da base do tubo (in ex.: numa fase inicial, não é essencial gerir situações de construção faseada ou de encurtamento do tubo).

<sup>4</sup> O InclinoReport dimensiona sempre a escala das ordenadas de acordo com as dimensões de cada instalação.

<sup>5</sup> Atualmente o InclinoReport só permite a produção de gráficos de desvio acumulado de campanhas de referência.

- inclusão de dados de precipitação e de níveis de água nos perfis de deslocamento<sup>1</sup>;
- execução de análises conjuntas entre os resultados inclinométricos e outros dados externos (in ex.: níveis de água e precipitação)<sup>1</sup>;
- abertura incremental de instalações inclinométricas<sup>2</sup>;
- inexistência de um aviso mediante a ausência do ficheiro de dados adicionais (DAT)<sup>3</sup>;

Para além destas, considera-se igualmente importante a inclusão das seguintes:

- produção de resultados incrementais (in ex.: desvios, deslocamentos e evoluções);
- produção de resultados de evolução no tempo dos deslocamentos<sup>4</sup> nas direções *A* e *B*;
- estimativa do erro (6.5) com representação gráfica dos limites respetivos nos resultados;
- gestão de alterações de profundidade<sup>5</sup>;
- comunicação direta com as unidades de aquisição<sup>6</sup>;
- importação/exportação de dados noutros formatos;
- pré-visualização de resultados nas formas numérica e gráfica;
- nova estrutura de dados que permita:
  - o a identificação do instrumento utilizado em cada campanha<sup>7</sup>;
  - o a identificação das profundidades de medição em cada campanha<sup>8</sup>;
  - o a inclusão da hora de execução da campanha<sup>9</sup>;
  - o a inclusão das informações do ficheiro de dados adicionais (5.6; 5.7; 5.11.3);
  - o a dissociação entre a seleção de campanhas e a sua validade<sup>10</sup>;
  - o a inclusão de outras funcionalidades fora do âmbito deste documento<sup>11</sup>.

<sup>1</sup> A implementação desta funcionalidade deverá permitir também a inclusão de outros tipos de dados externos (in ex.: células de carga, observações topográficas, etc.). Portanto, esta implementação deve ser pensada de forma permitir a sua expansão futura.

<sup>2</sup> O InclinoReport não dispõe de um conceito de obra, no sentido de existir uma entidade detentora de um conjunto de elementos (in ex.: instalações). Assim, as instalações de determinada obra são importadas em conjunto, não havendo a opção de alterar o conjunto (in ex.: a importação de novos elementos elimina da memória as instalações previamente abertas).

<sup>3</sup> O ficheiro de dados adicionais inclui informação importante, de entre a qual se destaca o histórico de referências. Por esta razão, estes ficheiros devem sempre acompanhar os ficheiros de dados. Mediante a sua ausência, o InclinoReport cria este ficheiro automaticamente; o problema coloca-se quando o operador copia ficheiros de dados para outro local e não inclui os ficheiros DAT.

<sup>4</sup> O InclinoReport só permite o processamento de evoluções no tempo da resultante dos deslocamentos (5.4) e da distorção horizontal (5.8.1). O processamento de evoluções no tempo dos deslocamentos nas direções *A* e *B* encontra-se parcialmente programado.

<sup>5</sup> Em casos de assoreamento ou de lavagem da base do tubo, atualmente as leituras são copiadas de campanhas anteriores ou eliminadas. Há formas mais adequadas para lidar com estas situações, inclusivamente em casos de corte do tubo ou de montagem faseada durante a construção de aterros.

<sup>6</sup> O NGUT já dispõe de um programa para recolha de dados de uma unidade de aquisição, designado GetSoilData e desenvolvido em 2015. Considera-se que esta funcionalidade deveria ser incorporada no InclinoReport, possivelmente na forma de extensão, uma vez que, de um modo geral, é fácil extrair a informação das unidades de aquisição em formato de texto.

<sup>7</sup> Esta funcionalidade permitirá o processamento de campanhas com dados provenientes de vários instrumentos sem necessidade de recorrer ao uso de múltiplas referências (5.9) ou à correção da orientação axial dos sensores (6.4.3). Note-se que será também necessário acomodar diferenças de profundidade de medição eventualmente existentes.

<sup>8</sup> Esta funcionalidade é necessária para acomodar alterações de profundidade do tubo.

<sup>9</sup> Embora o InclinoReport aceite a redundância de datas de execução, a inclusão da hora é importante, por exemplo, em casos de acompanhamento de obra com frequências de observação muito elevadas (in ex.: escavações e aterros com risco elevado).

<sup>10</sup> Atualmente, a invalidação de campanhas depende da seleção das mesmas para processamento de perfis e/ou de evoluções de deslocamentos. Esta regra deriva do formato de ficheiro que o InclinoReport herdou do *software* anteriormente utilizado, mas considera-se que as funções de validação e de seleção devem ser completamente dissociadas.

<sup>11</sup> Por exemplo, a capacidade de registar o histórico de alterações, identificar os utilizadores, introdução de notas/relatórios, referência às correções aplicadas, entre outras.

Face ao exposto, no quadro seguinte apresenta-se uma lista de objetivos a implementar no InclinoReport, organizados em três graus de prioridade, complexidade e morosidade.

Quadro 24 – Lista de objetivos a implementar no InclinoReport.

Prioridade	Complexidade <sup>1</sup>	Morosidade <sup>2</sup>	Objetivo
Elevada	Elevada	Elevada	Dissociação do MSOE (implementação do OOXML) <sup>3</sup>
	Média	Média	Nova estrutura de dados
	Baixa	Média	Importação/exportação de dados noutros formatos
	Baixa	Baixa	Comunicação direta com as unidades de aquisição
	Média	Elevada	Avaliação de indicadores de qualidade
	Elevada	Elevada	Identificação/correção de erros de medição
	Baixa	Baixa	Pré-visualização de resultados na forma numérica
	Baixa	Baixa	Gestão de assoreamentos/lavagens da base dos tubos
Média	Baixa	Baixa	Evolução no tempo dos deslocamentos das direções <i>A</i> e <i>B</i>
	Baixa	Média	Produção de resultados incrementais
	Média	Média	Inclusão de dados de precipitação e níveis de água nos resultados
	Baixa	Baixa	Resultados de desvio acumulado de qualquer campanha
	Baixa	Baixa	Escalas verticais automáticas do tipo comum ou diferenciado
	Baixa	Média	Definição personalizada de escalas e legendas
	Elevada	Incremental <sup>3</sup>	Reorganização do código <sup>4</sup>
Baixa	Baixa	Média	Gestão de alterações de profundidade (in ex.: construção faseada)
	Elevada	Elevada	Pré-visualização de resultados na forma gráfica
	Média	Média	Estimativa do erro
	Elevada	Elevada	Análises conjuntas entre os resultados inclinométricos e outros
	Média	Elevada	Reorganização da interface <sup>5</sup>

<sup>1</sup> A complexidade inclui a dificuldade de conceção e de execução, incluindo as alterações de código que o objetivo implica.

<sup>2</sup> A morosidade corresponde aproximadamente à estimativa: *Baixa* – até 1 mês; *Média* – 1 a 3 meses; *Elevada* – mais de 3 meses.

<sup>3</sup> As representações gráficas produzidas pelo InclinoReport são fortemente personalizadas (in ex.: não são gráficos típicos do MSOE), tornando o processo de construção moroso e complexo, dificultando também a edição gráfica posterior. Por esta razão, considera-se que será vantajoso simplificar a representação gráfica de resultados anteriormente à dissociação do MSOE, reduzindo também o tempo de processamento enquanto o desenvolvimento decorre.

<sup>4</sup> A reorganização do código será executada faseadamente, conforme as necessidades impostas e as oportunidades apresentadas aquando da implementação de outras funcionalidades, como é o caso de uma nova estrutura de dados.

<sup>5</sup> A implementação de novas funcionalidades implicará obrigatoriamente alterações à interface. Contudo, o objetivo de reorganizar a interface refere-se à substituição integral da interface atual. Este processo será necessário no sentido melhorar a intuição do interface de utilização e de comportar devidamente as funcionalidades implementadas, como sejam a implementação de uma nova estrutura de dados, a pré-visualização de resultados e a avaliação qualitativa das leituras inclinométricas.

## 7.10. Outras propostas de trabalho futuro

Sugerem-se alguns aspetos adicionais que poderão beneficiar de estudos específicos:

- Tubos inclinométricos: os tubos plásticos são atualmente a norma no que respeita a instalações inclinométricas. Este tipo material (in ex.: ABS, 3.2.2) é sistematicamente apresentado como sendo superior ao alumínio, principalmente pela comunidade do norte da América. A argumentação utilizada remonta a décadas anteriores e resume-se à possibilidade de corrosão em ambientes alcalinos. A experiência do Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) demonstra que os tubos de alumínio têm grande fiabilidade e oferecem uma longa longevidade. Por esta razão, poderá ser interessante conduzir um estudo sério sobre a qualidade construtiva e o comportamento de tubos de alumínio e em ABS. Note-se que os tubos plásticos são fornecidos pelos fabricantes de inclinómetros, enquanto os tubos de alumínio beneficiam a economia local. Mais, a qualidade e a geometria (in ex.: espessura, diâmetro, calhas, uniões) dos tubos plásticos varia em função do fornecedor, enquanto a dos tubos de alumínio é especificada pelo cliente.
- Caldas de enchimento: existe um défice de informação sobre a composição de caldas de enchimento, o comportamento mecânico respetivo e a adequação das mesmas a tipos de solo específicos. Os parâmetros de resistência e de deformabilidade que têm maior importância relativamente às características mecânicas de cada cenário geotécnico também não estão bem definidos. A comunidade poderia beneficiar de um estudo sobre a relação entre a composição material de caldas de enchimento, o comportamento mecânico respetivo e determinadas condições geotécnicas.
- Estimativa de parâmetros geotécnicos: a modelação do comportamento mecânico de estruturas geotécnicas é uma das áreas de investigação mais intensamente desenvolvidas em geotecnia. Normalmente, o modelo parte de parâmetros geotécnicos bem definidos, da geometria da estrutura a modelar e de uma série de condicionantes externas impostas ao modelo (in ex.: solicitações mecânicas, pressões hidráulicas, etc.). Conhecendo-se o comportamento mecânico da estrutura (in ex.: através de medições inclinométricas), a geometria, as principais condicionantes (in ex.: solicitações mecânicas e regime hidráulico) e uma classificação aproximada do solo (in ex.: através de registos de perfuração), talvez seja possível obterem-se estimativas dos parâmetros geotécnicos correspondentes por modelação numérica.



## 8. CONCLUSÕES

### 8.1. Considerações iniciais

A aplicação de inclinómetros em trabalhos geotécnicos tem uma utilidade fulcral numa grande diversidade de operações. No entanto, a utilização destes dispositivos é muitas vezes mal sucedida, seja devido a insuficiências das práticas utilizadas, seja por dificuldade de interpretação dos resultados obtidos.

A bibliografia que trata esta matéria concentra-se muitas vezes na interpretação de resultados e omite certos aspetos operacionais que são determinantes para a obtenção de dados confiáveis. No caso dos inclinómetros, estes aspetos operacionais têm uma relevância acrescida, já que os resultados se obtêm por integração de séries de medições, potenciando a acumulação de pequenos erros que isoladamente parecem desprezáveis. Neste trabalho apresenta-se uma perspetiva operacional sobre a aplicação de inclinómetros no âmbito da geotecnia, já que a bibliografia e o conhecimento experimental neste domínio se encontram muito dispersos, incompletos e frequentemente desatualizados.

Para além da apresentação detalhada do estado da arte e do estado da prática, apresenta-se também um estudo profundo relativo à análise qualitativa e correção de dados inclinométricos, incluindo-se uma revisão dos procedimentos de verificação e de calibração de equipamentos inclinométricos. Com base neste estudo propõem-se diversas metodologias para a aferição e correção de dados inclinométricos, apresentando-se também um levantamento exaustivo do trabalho futuro a realizar nesta importante área da geotecnia. Os aspetos principais do trabalho são resumidos a seguir.

### 8.2. Resumo conclusivo

Os inclinómetros são instrumentos que possuem uma haste rígida com dimensão determinada e que permitem a medição de inclinações relativamente a um plano de referência. O conhecimento do ângulo de inclinação e da dimensão da haste permite o cálculo do cateto oposto, designado por desvio incremental (in ex.: segmento de reta transversal ao plano de referência). A integração de uma sequência de medições com espaçamento equivalente à dimensão da haste permite o cálculo do perfil do eixo observado (in ex.: um furo de sondagem). Esta técnica designa-se por inclinometria (*inclinometry*) e remonta à segunda metade do século XIX, no âmbito do acompanhamento das operações de perfuração associadas à exploração mineira e petrolífera (1.1; 1.2).

A diferença entre dois perfis obtidos em datas distintas permite quantificar o perfil dos movimentos ocorridos naquele intervalo de tempo e identificar as secções afetadas pelos mesmos. Este

princípio foi primeiramente aplicado em 1948 com grande sucesso. Alguns anos mais tarde surgiu o primeiro inclinómetro propositadamente desenvolvido para aplicações geotécnicas. Este novo instrumento distingue-se dos seus antecessores por incluir rodas que circulam no interior de ca-lhas de rodagem dum tubo específico (in ex.: tubo inclinométrico), dispensando assim um sensor azimutal. O tubo inclinométrico é previamente instalado de forma a constituir um ponto de refe-rência estável numa das extremidades e a assegurar boa conformidade com o meio circundante. Estas características, juntamente com o tipo de sensor que estes instrumentos incorporam, torna-ram o inclinómetro numa ferramenta de trabalho imprescindível para uma grande variedade de aplicações geotécnicas relacionadas com a segurança e com o desempenho de obra (1.1; 1.2).

No âmbito da instrumentação geotécnica, os inclinómetros classificam-se como um padrão de de-formação transversal e são utilizados principalmente no acompanhamento da estabilidade de ta-ludes (in ex.: escavações e aterros), do desempenho de estruturas de suporte, de fundações pro-fundas, de escavações subterrâneas e de assentamentos em obras de aterro (1.3).

Existem várias tipologias de inclinómetro disponíveis no mercado, podendo estas distinguir-se em função do tipo de sensor, do plano de referência e da portabilidade. Os inclinómetros podem ter um plano de referência vertical, horizontal ou oblíquo, podem ser de carácter fixo ou portátil e podem, potencialmente, incluir sensores bastante distintos (2).

Os instrumentos fixos têm aplicação em grandes superfícies, em áreas de acesso difícil e/ou onde haja a necessidade de execução de medições com frequência muito elevada. Esta tipologia de in-clinómetro é mais dispendiosa, mas permite a automatização remota do processo de medição e a definição de secções isoladas a observar (2.4.1; 2.4.2). O tipo de sensor preferencialmente incor-porado neste tipo de sistema caracteriza-se pelo baixo consumo energético e pela deriva do des-vio na origem reduzida, havendo menor preocupação com a sensibilidade térmica, com a lineari-dade e com a velocidade de resposta (in ex.: 2.2.2.2; 2.2.5.6).

Os instrumentos portáteis são mais flexíveis e menos dispendiosos, pelo que são mais amplamen-te utilizados (2.4.1; 2.4.3). Esta tipologia de inclinómetro incorpora preferencialmente sensores de resposta mais rápida, com maior linearidade, menor sensibilidade térmica e maior amplitude de medição, havendo menor preocupação relativamente à deriva do desvio na origem, uma vez que as medições são obtidas por redundância (in ex.: 2.2.4; 2.2.5.4).

Os sistemas inclinométricos são relativamente fáceis de utilizar e as instalações respetivas são normalmente pouco complexas. No entanto, os objetivos da observação inclinométrica só se con-seguem atingir mediante a correta aplicação, por pessoal técnico especializado, de uma série de procedimentos de instalação, de operação e de manutenção (3; 4).

Os tubos inclinométricos podem classificar-se em função do material de construção e do tipo de união com que são assemblados. Estes devem ser apropriados ao tipo de aplicação e devem ser devidamente acondicionados, de forma a garantir a manutenção do alinhamento axial e da limpeza das calhas interiores (3.2).

As instalações inclinométricas podem classificar-se em função do tipo de aplicação, designadamente por acoplamento exterior/incorporação estrutural (in ex.: para observação de elementos estruturais, 3.3), em furo de sondagem (in ex.: vertical, horizontal ou oblíquo, 3.4, 3.5, 3.6) ou em vala/trincheira (in ex.: para observação de assentamentos, 3.7). Estas instalações utilizam-se para traduzir os movimentos do terreno/estrutura em deformações equivalentes nos tubos inclinométricos, pelo que fazem parte integrante do aparato de medição. Compõem-se por um tubo inclinométrico e por um meio de transmissão das deformações do terreno ao tubo, devendo o último ter comportamento tão próximo ao do terreno/estrutura quanto possível. Os principais cuidados a ter durante a execução de uma instalação inclinométrica podem resumir-se em (3):

- perfuração/preparação do leito limpa, com dimensão e inclinação adequadas, sendo a última tanto mais próxima do plano de referência do instrumento quanto possível;
- isolamento eficaz da base e das uniões do tubo inclinométrico;
- alinhamento correto do tubo inclinométrico sem resistência à rotação do mesmo;
- preenchimento adequado do espaço entre o tubo e o meio circundante, com ausência de carga axial sobre o tubo.

Os inclinómetros são instrumentos sensíveis e devem ser armazenados, transportados e utilizados de forma adequada. O armazenamento deve fazer-se em ambiente seco e, em alguns casos, preferencialmente com inclinação próxima à do plano de referência. A operação de inclinómetros portáteis deve fazer-se com ausência de choques e integrar rotinas de limpeza e de lubrificação das rodas, de proteção, arejamento e limpeza dos terminais, e de verificação do cabo de ligação (4.3; 4.5).

As unidades de alimentação e de aquisição são também parte integrante do sistema, mas são frequentemente esquecidas. Estas unidades devem incluir baterias em boas condições de carga, uma vez que o nível de energia afeta a estabilidade das leituras inclinométricas (4.6).

A execução de campanhas de observação inclinométrica exige o controlo rigoroso das profundidades de medição, a manutenção do ponto de referência no topo do tubo e a estabilização adequada dos valores de leitura. Para que estes objetivos sejam atingidos é importante manter o mesmo sistema de medição durante o decurso do programa observacional (4.1; 4.2). No entanto, a ocorrência de avarias ou de outros constrangimentos, a interrupção e posterior retoma do plano de acompanhamento, ou a observação concorrente da mesma instalação por entidades distin-



tas obrigam muitas vezes à substituição dos equipamentos inclinométricos. Nestes casos, a continuidade da observação pode fazer-se pelo uso de múltiplas referências (5.6) ou por correção dos dados inclinométricos (in ex.: alinhamento axial dos acelerómetros – 6.4.3, profundidades de medição – 6.4.4 ou sensibilidade do instrumento – 6.4.5).

Os sistemas inclinométricos devem ser objeto de verificação metrológica com a frequência adequada, a fim de aferir o correto funcionamento dos mesmos e de ajustar o calendário de calibração (4.7.1).

A verificação metrológica pode realizar-se de diversas formas, designadamente em aparatos simplificados com rotação lateral, em troços de tubo ou em instalações propositadamente concebidas para o efeito. Em último recurso, a verificação pode fazer-se através da análise conjunta de um número significativo de dados de obra provenientes de zonas consideradas estáveis (4.7.2).

A calibração de inclinómetros faz-se em dispositivos específicos, comumente designados por mesas rotativas. A aquisição de uma mesa rotativa pode ser vantajosa dependendo dos custos expectáveis de calibração, da quantidade de dispositivos a manter e do nível de precisão exigido. Os critérios de seleção dum equipamento de calibração devem basear-se fundamentalmente nos requisitos metrológicos dos inclinómetros e incluir margem de erro para inclusão de incertezas por determinar (4.7.3).

Na secção 5.10 demonstra-se que o método de cálculo comumente utilizado para obtenção de resultados inclinométricos contém um erro intrínseco. Este erro é negligenciável para inclinações até  $3 - 5^\circ$ , mas assume valores crescentemente significativos em inclinações mais acentuadas e em função da diferença entre as inclinações dos pares de calhas nos dois planos ortogonais. Este é um argumento importante no que respeita às recomendações de inclinação máxima das instalações inclinométricas.

A informação que os inclinómetros fornecem permite essencialmente o cálculo dos desvios incrementais e acumulados em duas direções ortogonais (in ex.: geometria do tubo), dos deslocamentos homónimos, da resultante dessas componentes e da orientação respetiva. Os resultados incrementais permitem identificar em que zonas decorrem movimentações e quantificar a magnitude respetiva. Os resultados acumulados permitem identificar a massa que se encontra em movimento e quantificar a magnitude total dos deslocamentos (5.1; 5.2; 5.3; 5.4).

Identificada a massa em movimento, pode proceder-se à análise seletiva de secções afetadas. Esta análise faz-se normalmente em função do tempo decorrido, de forma a permitir a estimativa de taxas de progressão dos deslocamentos. A análise de taxas de progressão ao longo do tempo e da sua variação são determinantes para a avaliação da estabilidade geotécnica, uma vez que ex-

primem o comportamento do terreno/estrutura face às condições/solicitações presentes (5.5).

As medições inclinométricas também permitem outros tipos de análise, como é o caso da estimativa da distorção ocorrida em cada secção e da estimativa de momentos em elementos estruturais (5.8; 5.9).

A estimativa de momentos por meios inclinométricos é atualmente pouco utilizada em favor de outras tecnologias mais expeditas e/ou mais fiáveis. Contudo, é importante reter estas técnicas, uma vez que poderão ser úteis no futuro. Ademais, encontram-se publicações relativamente recentes sobre a matéria que demonstram a sua aplicação corrente (5.9).

A estimativa das distorções ocorridas no terreno, ao longo do perfil observado, é um desenvolvimento recente da maior importância. Conhecendo-se o estado de tensão do terreno aquando do início do programa de observação inclinométrica, o acompanhamento da distorção permite a estimativa de um coeficiente de segurança local em função de parâmetros geotécnicos (5.8.2). Este método de análise altera as metodologias de diagnóstico dum paradigma estritamente baseado em taxas de progressão para outro com definição clara de limites máximos de deformação. No entanto, é absolutamente necessário que o comportamento mecânico do terreno seja bem conhecido, particularmente nas zonas de distorção identificadas.

O cálculo de distorções através de meios inclinométricos também permite a estimativa do tempo de vida útil das instalações inclinométricas (5.8.3). Este fator tem particular importância em obras de risco elevado, principalmente onde sejam definidos coeficientes de segurança em função das distorções estimadas (5.8.2). Pois, nestes casos convém planear atempadamente a substituição dos tubos inclinométricos que venham a ficar inoperacionais e a recolha de amostras de solo para confirmação da capacidade de deformação retida nas zonas de distorção e resistência ao corte correspondente. Esta técnica de previsão encontra-se ainda em estudo, tendo-se já desenvolvido a capacidade de estimar a distorção efetiva de tubos inclinométricos, identificando-se também situações particulares com limites máximos de deformação muito inferiores aos expectáveis (5.8.3.2).

Como base de trabalho no âmbito da segurança e do desempenho de obras geotécnicas, os resultados observacionais da instrumentação devem basear-se em dados de boa qualidade (in ex.: credíveis e consistentes). Este fator assume especial relevância no caso dos inclinómetros, uma vez que os resultados são produzidos por integração de dezenas de medições, nas quais se incluem e se podem acumular diversos tipos de erro. A redundância de informação que estes dispositivos fornecem (in ex.: duas leituras simétricas por medição) permite a avaliação qualitativa e a correção desses dados quando necessário (6).

Os inclinómetros acompanham-se de especificações técnicas que permitem definir valores de erro típico. O erro típico de medição pode ser analisado nas suas componentes aleatória e sistemática, a partir das quais se definem limites de confiança a aplicar na avaliação qualitativa dos respetivos dados (6.2). A avaliação qualitativa de dados inclinométricos baseia-se em indicadores estatísticos que derivam da redundância das leituras obtidas em cada secção de tubo. Da soma entre leituras simétricas obtêm-se parâmetros de expressão qualitativa, tais como a média, o desvio padrão e o diferencial de dispersão do conjunto de somas obtido em cada campanha de observação (6.3). Estes parâmetros, devidamente balizados por limites de confiança, definidos em função do erro típico do instrumento ou recomendados pelo fabricante, permitem (6.3; 6.4; 6.5):

- verificar a resposta metrológica e a necessidade de calibração dos instrumentos;
- identificar e quantificar a ocorrência de erros sistemáticos;
- estimar o erro de medição das curvas de deslocamento obtidas.

Existem diversos tipos de erro sistemático que afetam significativamente os resultados inclinométricos por serem de carácter generalizado e cumulativo, designadamente:

- erro de alteração do desvio na origem (6.4.2);
- erro de rotação (6.4.3);
- erro de profundidade (6.4.4);
- erro de deriva da sensibilidade (6.4.5).

Encontram-se documentadas metodologias de identificação, de quantificação e de correção destes erros. Estas técnicas baseiam-se essencialmente na análise conjunta dos diversos tipos de resultado. Especificamente:

- padrões específicos de deslocamento incremental e acumulado podem indiciar a presença dum erro de alteração do desvio na origem (6.4.2). Em certos casos, esta alteração pode identificar-se também através dos perfis de somas de leituras;
- a razão entre valores de deslocamento e de desvio pode fornecer parâmetros de correção do alinhamento axial (6.4.3) ou da sensibilidade metrológica (6.4.5) dos sensores;
- a comparação entre curvas de deslocamento e de desvio permite identificar a presença de erros de profundidade (6.4.4).

Neste documento introduzem-se ainda novas técnicas de análise e de correção de dados inclinométricos. Sublinham-se de seguida os principais elementos de inovação.

Na secção 6.4.3 identifica-se um erro concetual no método de correção de erros de rotação que se encontra documentado e que se aplica em programas comerciais de processamento automático. A alteração proposta permite a correção efetiva do erro de rotação em ambas as direções de medição. Este facto é importante mediante a permuta de instrumentos em instalações com incli-

nações e/ou profundidades consideráveis.

Na secção 6.4.5 apresenta-se um caso de estudo que demonstra aplicação dum método de correção de erros de sensibilidade a partir de dados de obra. Embora a ocorrência deste tipo de erro não seja comum, a capacidade de identificar e de corrigir erros de sensibilidade sem recurso a procedimentos de calibração laboratoriais constitui um avanço nas técnicas de análise de dados inclinométricos.

A análise de perfis de somas entre leituras simétricas permite identificar a presença de erros sistemáticos que ocorrem de forma esporádica e pontual. Foram desenvolvidos procedimentos de quantificação e de correção deste tipo de erro (6.4.7). Estas metodologias encontram-se fundamentadas na secção 6.4.2, onde se demonstra a sua aplicação a erros de alteração do desvio na origem. Os métodos apresentados introduzem maior objetividade na análise daquelas anomalias, mesmo quando ocorrem em zonas geotecnicamente instáveis. Permitem a correção efetiva dos dados, evitando ambiguidades interpretativas e a eventual repetição de campanhas de observação para confirmação das medições inclinométricas. Em última análise, estes métodos também permitem identificar e corrigir erros de natureza mais ou menos repetível que dificilmente se resolvem com a redundância de serviços (6.4.5; 6.4.7; anexos IX, X e XI).

Na secção 6.5 introduz-se a estimativa do erro de medição em curvas de perfil com base nos perfis de somas de leituras balizados pelo erro típico do sistema respetivo. Esta estimativa serve o propósito de avaliar a significância, não só dos deslocamentos obtidos (in ex.: do ponto de vista metrológico), como também dos erros de medição identificados e do benefício obtido pela sua correção.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1st Engineer Arctic Task Force, 1955. After operations report – 1st Engineer Arctic Task Force Research and Development Program – Greenland 1955. Armed Services Technical Information Agency, Arlington Hall Station, Arlington 12, Virginia. 148 pp.
- Abdoun, T., Bennett, V., Danisch, L. & Barendse, M., 2008. Real-Time Construction Monitoring with a Wireless Shape-Acceleration Array System. Alshawabkeh, A. N., Reddy, K. R. and Khire, M. V. (editors), Proceedings of sessions of GeoCongress 2008: Characterization, Monitoring, and Modeling of GeoSystems, 9-12 March 2008, New Orleans, Louisiana, United States. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1801 Alexander Bell Drive Reston, VA 20191-4400, USA. Geotechnical Special Publication No. 179, 2008, pp. 533-540.
- Abdoun, T., Bennett, V., Danisch, L., Shantz, T. & Jang, D., 2007. Field installation details of a wireless shape-acceleration array system for geotechnical applications. Tomizuka, M., Yun, C.-B. and Giurgiutiu, V. (editors), Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical and Aerospace Systems 2007. Proceedings of the Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers (SPIE), Volume 6529, 10 pp.. Abstract: <http://spie.org/Publications/Proceedings/Paper/10.1117/12.714413>, visitado em 2017-08-17.
- ACE, 2017. Inclinomater Casings. Product specifications/datasheet. ACE Instrument, Co., Ltd., ADD. 9, Dangjeong-ro 27beon-gil, Gunpo-si, Gyeonggi-do,(435-833) Korea. In: [http://aceco.co.kr/home\\_en/pro\\_en/2\\_Inclinometer\\_casing/1.pdf](http://aceco.co.kr/home_en/pro_en/2_Inclinometer_casing/1.pdf), visitado em 2017-10-08.
- ACE, 2016a. Figura original de ACE Instrument, Co., Ltd.. In: <http://www.aimil.com/Resources/ResourceFile/1390.pdf>, visitado em 2016-06-30.
- ACE, 2016b. Figura original de ACE Instrument, Co., Ltd.. In.: [http://aceco.co.kr/home\\_en/pro\\_en/8\\_Displacement\\_\(settlement\)/6.pdf](http://aceco.co.kr/home_en/pro_en/8_Displacement_(settlement)/6.pdf), visitado em 2016-07-25.
- Aerotech, 2010. ALAR Series. Direct Drive, Large-Aperture, Rotary Stage. Product Brochure. Aerotech Inc, 101 Zeta Drive, Pittsburgh, PA 15238. In: <https://www.aerotech.com/>, visitado em 2010-07-13.
- Alber, M., Plinninger, R. & Düllmann, J., 2011. On the Influence of Casing and Backfilling on Inclinomater Tests. Eighth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM 2011), 12-16 September 2011, Berlin, Germany. Humboldt-Universität zu Berlin, Unter den Linden 6, D-10099, 13 pp.
- APS, 2014. March 1880: The Curie Brothers Discover Piezoelectricity. David Voss (editor), This Month In Physics History, APS News, American Physical Society, 23(3):2-3.
- ASCE, 2016. Karl Terzaghi. American Society for Civil Engineering (ASCE). In: <http://www.asce.org/templates/person-bio-detail.aspx?id=11224>, visitado em 2017-01-23 [WWW Document].
- ASTM, 2012. Standard Practice for Verifying Performance of a Vertical Inclinomater Probe, ASTM D7299-12. ASTM International, 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States.
- Bahari, J. & Leung, A.M., 2011. Micromachined three-axis thermal accelerometer with a single composite heater. Journal of Micromechanics and Microengineering, 21(7), 13 pp.
- Bao, X. & Chen, L., 2006. Development of the Distributed Brillouin Sensors for Health Monitoring of Civil Structures. Bock, W. J., Gannot, I. and Tanev, S. (editors), Proceedings of the NATO Advanced Study Institute on Optical Waveguide Sensing and Imaging in Medicine, Environment, Security and Defence, October 12-21 2006, Gatineau, Québec, Canada. Springer, P.O. Box 17, 3300

AA Dordrecht, The Netherlands, 2008, pp. 101-125.

Bardeen, J. & Shockley, W., 1950. Deformation Potentials and Mobilities in Non-Polar Crystals. *Physical Review*, 80(1):72-80.

Barlian, A.A., Park, W.-T., Mallon Jr., J.R., Rastegar, A.J. & Pruitt, B.L., 2009. Review: Semiconductor Piezoresistance for Microsystems. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 97(3):513-552.

Bennett, K. & Zion, H., 2005. Metrology Concepts: Understanding Test Uncertainty Ratio (TUR). Transcat White Paper. In: <http://www.transcat.com/media/pdf/TUR.pdf>, visitado em 2018-04-13.

Bennett, V., Abdoun, T., Danisch, L., Shantz, T. & Jang, D., 2007a. Unstable slope monitoring with a Wireless Shape-Acceleration Array system. DiMaggio, J. and Osborn, P. (editors), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (FMGM 2007)*. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1801 Alexander Bell Drive Reston, VA 20191-4400, USA, 2007, 12 pp.

Bennett, V., Zeghal, M., Abdoun, T. & Danisch, L., 2007b. Wireless Shape-Acceleration Array System for Local Identification of Soil and Soil Structure Systems. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. Transportation Research Board of the National Academies, Washington D. C., USA, 2007, 2004:60–66.

Benz, D., Botzelmann, T., Kück, H. & Warkentin, D., 2005. On low cost inclination sensors made from selectively metallized polymer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 123–124:18–22.

BesTech, 2017. Electrolytic Tilt: Principle. BesTech: Sensors & Teaching Equipment (BesTech). Bes-tech Australia Pty. Ltd., Unit 14, 44 Garden Boulevard, Dingley, Victoria 3172, Australia. In: [bes-tech.com.au](http://bes-tech.com.au), visitado em 2017-01-18 [WWW Document].

BGS, 1974. *Field Instrumentation in Geotechnical Engineering*. A symposium organised by the British Geotechnical Society (BGS), held 30th May - 1st June 1973. The Butterworth Group, London, Australia, Canada, New Zealand, South Africa, pp. 13-37, 52-84, 112-179, 229-239, 262-303, 359-369, 423-436, 448-461, 517-526, 558-562, 589-594, 617-632, 636-637, 680-686, 687-697, 698-702, 708-710.

Billat, S., Glosch, H., Kunze, M., Hedrich, F., Frech, J., Auber, J., Lang, W., Sandmaier, H. & Wimmer, W., 2001. Convection-based micromachined inclinometer using SOI technology. In: *Technical Digest of the 14th Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'01)*, pp. 159-161.

Billat, S., Glosch, H., Kunze, M., Hedrich, F., Frech, J., Auber, J., Sandmaier, H., Wimmer, W. & Lang, W., 2002. Micromachined inclinometer with high sensitivity and very good stability. *Sensors and Actuators A: Physical*, 97-98:125-130.

BiTech, 2008. BiTech Publishers Ltd. (BiTech). *Geotechnical Instrumentation News (GIN)*, 54:1-3, 6-10. *Geotechnical News (GN)*, 54:31-33, 36-44.

BiTech, 2007. BiTech Publishers Ltd. (BiTech). *Geotechnical Instrumentation News (GIN)*, 52:4-12. *Geotechnical News (GN)*, 52:27-35.

BiTech, 2003. BiTech Publishers Ltd. (BiTech). *Geotechnical Instrumentation News (GIN)*, 35:11-19. *Geotechnical News (GN)*, 35:51-59.

Bjerrum, L., Casagrande, A., Peck, R.B. & Skempton, A.W., 1960. *From Theory to Practice in Soil Mechanics: selections from the writings of Karl Terzaghi, with bibliography and contributions on his life and achievements*. John Wiley & Sons, New York, London, 426 pp.

Blackburn, J.T. & Dowding, C.H., 2004. Finite Element Analysis of TDR Cable-Grout-Soil Mass Interaction During Localized Shearing. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,

130(3), 33 pp.

Blake, E.W. & Clarke, G.K.C., 1992. Interpretation of borehole-inclinometer data: a general theory applied to a new instrument. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 38(128):113-124.

Blikra, L.H., 2008. The Åknes rockslide: Monitoring, threshold values and early-warning. Chen, Z., Zhang, J., Li, Z., Wu, F. and Ho, K. (editors), *Proceedings of the Tenth International Symposium on Landslides and Engineered Slopes*, 30 June – 4 July, 2008, Xi'an, China. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, 2:1089-1094.

Bloembergen, N. & Pershan, P.S., 1962. Light Waves at the Boundary of Nonlinear Media. *Physical Review*, 128(2):606-622.

Boeckmann, A.Z., Myers, S.G., Uong, M. & Loehr, J.E., 2014. Comparison of Drilled Shaft Structural Response from Strain Gage and Shapeaccelarray (SAA) Data. *Proceedings of the 39th Annual Conference on Deep Foundations*, October 21-23 2014, Atlanta, GA, USA, pp. 141-150.

Bordas, S.P., 1998. Numerical Simulation of Measured Time Domain Reflectometry Signatures. Northwestern University. A Thesis submitted to the Department of Civil Engineering in partial fulfillment of the requirements for the degree Master of Science, field of Civil Engineering, 67 pp. (Dissertação de Mestrado).

Bronzov, A.S., Vasil'ev, Iu. S. & Shetler, G.A., 1965. Inclinometry. Turbinnoe buenie naklonnykh skvazhin, 2nd ed., Moscow, in *The Great Soviet Encyclopedia*, 3rd ed. (1970-1979), in: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/inclinometry>, visitado em 2017-01-18.

Brown, R.L., 2006. Using a manufacturer's specification as a Type B error contribution. *NCSL International Workshop and Symposium*, Nashville, TN, August 6-10, 2006, 16 pp.

Brunner, F.K., Woschitz, H. & Macheiner, K., 2007. Monitoring of Deep-seated Mass Movements. Baidar Bakht & Aftab Mufti (Eds.), *Proceedings of The 3rd International Conference on Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure: Structural Health Monitoring & Intelligent Infrastructure*, Vancouver, British Columbia, Canada, November 13-16, 2007, CD-Rom, 10 pp.

Bugnacki, M., Pyle, J. & Emerald, P., 2001. A Micromachined Thermal Accelerometer for Motion, Inclination, and Vibration Measurement. *Sensors Online*, June 2001. In: <http://archives.sensorsmag.com/articles/0601/98/index.htm>, visitado em 2014-08-21.

Byrne, P.M., Cheung, H. & Yan, L., 1987. Soil parameters for deformation analysis of sand masses. *Canadian Geotechnical Journal*, 24(3):366-376.

Cai, Y., Fennelly, J. & Grace, R.H., 2013. Thermally-based MEMS sensors. *Commercial Micro Manufacturing International (CMM)*, 6(2):36-39.

Carvalho, M.R., 1997. Análise Distorcional de Solos Aluvionares Lodosos. Dissertação elaborada no Laboratório Nacional de Engenharia Civil para obtenção do grau de Mestre em Mecânica dos Solos pela Universidade Nova de Lisboa. Edição 2003, Divisão de Edições e Artes Gráficas, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Avenida do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, 303 pp. (Tese de Mestrado).

Carvalho, M.R., Coimbra, L. & Salgado, F.M., 2016. Estimativa do tempo de vida útil dos tubos de observação inclinométrica com recurso à análise distorcional. *Atas do 15º Congresso Nacional de Geotecnia (15CNG) / 8º Congresso Luso-Brasileiro de Geotecnia (8CLBG)*, 19-23 de Junho de 2016. Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 12 pp.

Chen, C., Han, Q. & Zhang, F., 2008. Micro-machined gas-pendulum dual-axis tilt sensors. In: *Proceedings of the International Conference on Micro and Nanotechnology for Power Generation*



and Energy Conversion Applications (PowerMEMS'08), Sendai, Japan, November 9-12, 2008, pp. 361-364.

Chen, P.-L., Muller, R.S., Jolly, R.D., Halac, G.L., White, R.M., Andrews, A.P., Lim, T.C. & Motamedi, M.E., 1982. Integrated Silicon Microbeam PI-FET Accelerometer. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Transactions on Electron Devices, 29(1):27-33.

Choi, J.C., Choi, Y.C., Lee, J.K. & Kong, S.H., 2013. Electrolytic Tilt Sensor with Domed Cap for Improved Performance. Japanese Journal of Applied Physics, 52(6S), 4 pp.

Clark, E.F., 1965. Camp century evolution of concept and history of design construction and performance – Technical Report 174. U.S. Army Materiel Command, Cold Regions Research & Engineering Laboratory (CRREL), Hanover, New Hampshire. 62 pp.

Clayton, C.R.I., Matthews, M.C. & Simons, N.E., 1995. Site Investigation. Second Edition, Department of Civil Engineering, University of Surrey, Guildford, Surrey GU2 7XH, United Kingdom. In: <http://www.geotechnique.info/>, visitado em 2018-05-03.

Coimbra, L., 2016. Inclínómetros de Sonda Vertical. Princípios fundamentais de funcionamento, operação e obtenção de resultados. “Programa de Capacitação de Laboratórios de Engenharia da CPLP, 2015/2016”. Documento de apoio à formação no domínio da estabilidade de taludes. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, 66 pp.

Coimbra, L., 2011. Reflexão sobre a qualidade dos dados inclinométricos. Proposta para implementação de um sistema para controlo da qualidade metrológica dos instrumentos de medição angular. Proc. 501/11/17734, 503/532/357, informação técnica, DG/NFTOS. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, 130 pp.

Coimbra, L., 2007. InclinoReport v0.1. Manual de utilizador. Software para processamento de dados inclinométricos. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, 91 pp.

Combette, P., Nougaret, L., Pascal-Delannoy, F. & Giani, A., 2007. A New Thermal Accelerometer Based on Pyroelectric Materials. Integrated Ferroelectrics, 95:142-157.

Crespy, N., Courteaud, J., Combette, P., Boyer, P.T., Giani, A. & Foucaran, A., 2008. Micromachined Inclinerometer Based on Fluid Convection. In: Proceedings of the 2008 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP'08). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Nice, France, April 9-11, 2008, pp. 177-181.

Csipkes, A., Ferguson, S., Graver, T.W., Haber, T.C., Méndez, A. & Miller, J.W., 2005. The maturing of optical sensing technology for commercial applications. Ou, J., Li, H. and Duan, Z. (editors), Proceedings of the 2nd International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, November 16-18, 2005, Shenzhen, China. CRC Press, Taylor & Francis Group, Informa Group, 5 Howick Place, London, SW1P 1WG, UK, Volume 1, 6 pp.

Danisch, L., 1997. Fiber Optic Bending and Positioning Sensor with Selected Curved Light Emission Surfaces. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 5,633,494.

Danisch, L., Lowery-Simpson, M.S. & Abdoun, T.H., 2007. Shape-Acceleration Measurement Device and Method. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 7,296,363 B2.

Danisch, L., Lowery-Simpson, M.S. & Abdoun, T.H., 2005. Shape-Acceleration Measurement Device and Method. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 2005/0284221 A1.

- Dao, R., Morgan, D.E., Kries, H.H. & Bachelder, D.M., 1996. Convective Accelerometer and Inclimeter. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 5,581,034.
- Dauderstädt, U.A., de Vries, P.H.S., Hirastuka, R. & Sarro, P.M., 1995. Silicon accelerometer based on thermopiles. *Sensors and Actuators A: Physical*, 46:201-204.
- Delage, P., Desrues, J., Frank, R., Puech, A. & Schlosser, F. (Eds.), 2013. Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: Challenges and Innovations in Geotechnics, September 2-6 2013. Presses des Ponts, 15 rue de la Fontaine au Roi, 75127 Paris cedex 11, France. 1:1855-1858, 1863-1874.
- DELLC, 2018. SITE MASTER 2018. Inclimeter Software User's Manual version 5.0.1.0. Deep Excavation LLC, 240 W 35th Street, Suite 1004, New York, NY, 10001, U.S.A, 68 pp.
- Dennis, N.D., Ooi, C.W. & Wong, V.H., 2006. Estimating Movement of Shallow Slope Failures Using Time Domain Reflectometry. In: Proceedings of the 3rd International Symposium and Workshop on Time Domain Reflectometry for Innovative Geotechnical Applications. Purdue University, West Lafayette, USA, September 2001, 16 pp.
- DGSI, 2014a. In-Place Inclimeter Sensors. Product specifications/datasheet. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2014b. Digitilt AT Inclimeter System. Product specification/datasheet. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2014c. DigiPro2 (50310199). User Manual. Durham Geo Slope Indicator (DGSI), 12123 Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275, 42 pp.
- DGSI, 2013a. Horizontal In-Place Inclimeter Sensors. Product specifications/datasheet. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2013b. Inclimeter Casing. Product specifications/datasheet. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2013c. Digitilt Classic Inclimeter System. Product specification/datasheet. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2013d. Spiral Sensor. Product datasheet/specifications. Durham Geo-Enterprises (DGSI), 12123 H arbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275.
- DGSI, 2007. Digitilt DataMate II (50310999). Product Manual. Durham Geo Slope Indicator (DGSI), 12123 Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275, 19 pp.
- Dobbert, M., 2010. Setting and Using Specifications - An Overview. *Measure*, 43(3):68-73.
- Dowding, C.H. & O'Connor, K.M., 2000. Comparison of TDR and Inclimeters for Slope Monitoring. GeoDenver 2000, Geoinstitute of ASCE, Denver, Colorado, August 5-7, 2000, 11 pp.
- Dowding, C.H., Su, M.B. & O'Connor, K., 1989. Measurement of Rock Mass Deformation with Grouted Coaxial Antenna Cables. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 22(1):1-23.
- Dowding, C.H., Su, M.S. & O'Connor, K., 1988. Principles of Time Domain Reflectometry Applied to Measurement of Rock Mass Deformation. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 25(5):287-297.
- DSERVICE, 2017a. Tubi Inclimetrici in ABS 2" e 3". Specifiche di prodotto. Drill Service (DSERVICE), Zona Art.le Ripoli, Viale 1° Maggio, Mosciano S. Angelo (TE), Italy. In: [http://drillservice.it/thats-bin/items/85519\\_TUBI\\_INCLINOMETRICI\\_2\\_E\\_3\\_POLLICI\\_ABS.pdf](http://drillservice.it/thats-bin/items/85519_TUBI_INCLINOMETRICI_2_E_3_POLLICI_ABS.pdf), visitado em 2017-10-04 [WWW Document].
- DSERVICE, 2017b. Geotecnia: Tubi Inclimetrici. Specifiche di prodotto. Drill Service (DSERVICE),

Zona Art.le Ripoli, Viale 1° Maggio, Mosciano S. Angelo (TE), Italy. In: [http://drillservice.it/thats-bin/items/26304\\_TUBI%20INCLINOMETRICI.pdf](http://drillservice.it/thats-bin/items/26304_TUBI%20INCLINOMETRICI.pdf), visitado em 2017-10-04 [WWW Document].

Duncan, J.M., Byrne, P., Wong, K.S. & Mabry, P., 1980. Strength, stress-strain and bulk modulus parameters for finite element analyses of stresses and movements in soil masses. Report No. UCB/GT/80-01. College of Engineering Office of Research Services, University of California, Berkeley, California, 80 pp.

Duncan, J.M. & Chang, C.-Y., 1970. Nonlinear analysis of stress and strain in soils. *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, 96(5):1629-1652.

Dunnicliff, C.J., 1972. Equipment for field deformation measurements. 4th Pan American Conference on Soil Mechanics, Puerto Rico, 2:319-332. Republished: *Highway Focus*, 4(2):90-103. Abstract: <http://trid.trb.org/view/120269>, visitado em 2017-02-13.

Dunnicliff, J., 1988. *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 577 pp.

DW&A, 2010. MEMSIC introduces industry's first fully integrated digital orientation sensor. Press release by Donna Wilson & Associates.

EBO, 2018. Sir Ronald Aylmer Fisher. *Encyclopædia Britannica Online (EBO)*. Encyclopædia Britannica Inc., in: <https://www.britannica.com/biography/Ronald-Aylmer-Fisher>, visitado em 2018-10-01.

EBO, 2017a. Capacitance. *Encyclopædia Britannica Online (EBO)*. Encyclopædia Britannica Inc., in: <https://www.britannica.com/science/capacitance>, visitado em 2017-02-23.

EBO, 2017b. Dielectric. *Encyclopædia Britannica Online (EBO)*. Encyclopædia Britannica Inc., in: <https://www.britannica.com/science/dielectric>, visitado em 2017-05-19.

ECMA, 2016a. Office Open XML File Formats – Part 1: Fundamentals and Markup Language Reference, ECMA-376-1, 5th edition. European Computer Manufacturers Association (ECMA), ECMA International, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, 5029 pp.

ECMA, 2016b. Office Open XML File Formats – Part 4: Transitional Migration Features, ECMA-376-4, 5th edition. European Computer Manufacturers Association (ECMA), ECMA International, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, 1537 pp.

ECMA, 2015. Office Open XML File Formats – Part 3: Markup Compatibility and Extensibility, ECMA-376-3, 5th edition. European Computer Manufacturers Association (ECMA), ECMA International, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, 35 pp.

ECMA, 2012. Office Open XML File Formats – Part 2: Open Packaging Conventions, ECMA-376-2, 4th edition. European Computer Manufacturers Association (ECMA), ECMA International, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, 129 pp.

ELEXON, 2016a. Geo4Sight. Wireless Subsurface Monitoring System. Product brochure, Elexon Electronics, 6/253 Leitchs Road, Brendale QLD 4500, Australia. In: [http://www.elexonmining.com/emws/wp-content/uploads/2016/11/Geo4Sight-Brochure\\_email.pdf](http://www.elexonmining.com/emws/wp-content/uploads/2016/11/Geo4Sight-Brochure_email.pdf), visitado em 2017-02-20.

ELEXON, 2016b. Networked Smart Marker System. Product brochure, Elexon Electronics, 6/253 Leitchs Road, Brendale QLD 4500, Australia. In: <http://www.elexonmining.com/emws/wp-content/uploads/2016/05/Networked-Smart-Markers.pdf>, visitado em 2017-02-20.

ENCARDIO, 2017. Digital Inclinometer, Model EAN-26M. Product specifications/datasheet 1212-11, v2. Encardio-Rite Electronics Pvt. Ltd. (ENCARDIO), A-7 Industrial Estate, Talkatora Road, Lucknow, UP-226011, India, in: [http://www.encardio.com/download/Inclino\\_Inplace\\_Plumbline/EAN-26M\\_Digital%20Inclinometer.pdf](http://www.encardio.com/download/Inclino_Inplace_Plumbline/EAN-26M_Digital%20Inclinometer.pdf), visitado em 2017-08-20.

- Evans, J.W., 1913. The wearing down of the rocks. In: *Proceedings of the Geologists' Association*, 24(5):241-300.
- Faletto, C., Novello, E. & Tible, P., 2011. The Case History of the Bagnaschino Landslide, from Early Warning to Site Specific Rainfall Threshold. Margottini, C., Canuti, P. and Sassa, K. (editors), *Proceedings of the Second World Landslide Forum (2nd WLF)*, 3-7 October 2011, Rome, Italy. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2013, 2:537-542.
- Farrington, S.P. & Sargand, S.M., 2006. Advanced Processing of Time Domain Reflectometry for Improved Slope Stability Monitoring. DeGroot, D. J., DeJong, J. T., Frost, D. and Baise, L. G. (editors), *Proceedings of the GeoCongress 2006: Geotechnical Engineering in the Information Technology Age*, Atlanta, Georgia, February 26-March 1, 2006. American Society of Civil Engineers (ASCE), 1801 Alexander Bell Drive Reston, VA 20191-4400, USA. Geotechnical Special Publication, 2006, 6 pp.
- Fennelly, J., 2016. Capacitive Versus Thermal MEMS for High-Vibration Applications. MEMSIC White paper.
- Fennelly, J., Ding, S., Newton, J. & Zhao, Y., 2012. Thermal MEMS Accelerometers Fit Many Applications. *Sensor Magazin* 3/2012, pp. 18-20.
- Fisher, J.E., 1952. Extrusion Flow – Comments on Dr. J. F. Nye's paper. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 2(11):51-52.
- Fogolino, L., Lovisolo, M. & Blikra, L.H., 2008. Early-Warning System software for the integrated handling of subsurface monitoring (DMS) of the Åknes rockslide. European Geosciences Union General Assembly 2008, Vienna, Austria, 13-18 April 2008. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 10, EGU2008-A-09148.
- Fogolino, L., Lovisolo, M. & Giusta, A.D., 2006. Contribution of DMS monitoring systems in the analysis of slide micro-movements for early warning management, risk assessment and evaluation of mitigating actions. European Geosciences Union General Assembly 2006, Vienna, Austria, 02-07 April 2006. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 8, EGU06-A-06122.
- Frodl, H., 2000. High-precision Ground Settlement & Movement Measurement with TRIVEC. Solexperts AG, Mettlenbachstrasse 25, Postfach 81, 8617 Mönchaltorf, Switzerland, 11 pp.
- Frodl, H. & Naterop, D., 2007. Trivec and Sliding Micrometer: fully digital instruments for geotechnical displacement and deformation measurement. DiMaggio, J. and Osborn, P., 2007 (editors), *Proceedings of the Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (7th FMGM)*. American Society of Civil Engineers (ASCE), Boston, Massachusetts, September 24-27, 2007, 12 pp.
- Garcia, A., Palmero, D., Vaqué, E. & Manuel, A., 2009. Conformity of the quality in the measures. *Instrumentation Viewpoint*, 8:4.
- Gardellini, S. & Osimani, P., 2008. Living with landslide: the Ancona case history and early warning system. Sassa, K. (Chairperson for the Editorial Committee of the Parallel Session Volume, Global Promotion Committee of The International Programme on Landslides – IPL), *Proceedings of The First World Landslide Forum (1st WLF)*, 18-21 November 2008, United Nations University, Tokyo, Japan. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR), International Consortium on Landslides (ICL), Parallel Session Volume, pp. 117-120.
- Garraud, A., Combette, P., Pichot, F., Courteaud, J., Charlot, B. & Giani, A., 2011a. Frequency response analysis of an accelerometer based on thermal convection. *Journal of Micromechanics and Microengineer*, 21(3), 6 pp.
- Garraud, A., Giani, A., Combette, P., Charlot, B. & Richard, M., 2011b. A dual axis CMOS micromachined convective thermal accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 170:44-50.

GEOENGINEER, 2017. Biography: Ralph B. Peck (1912-2008). Professor Ralph Peck's Legacy Website. In: <http://peck.geoengineer.org/biography.html>, visitado em 2017-01-20 [WWW Document].

GEOI, 2017. Fixed Inclinometers. Product specifications/datasheet. Geo Instruments (GEOI), 24 Celestial Drive, Narragansett, RI 02882. In: <https://www.geo-instruments.com/wp-content/uploads/fixed-inclinometer.pdf>, visitado em 2017-10-09.

GEOKON, 2017a. MEMS In-Place Inclinometer Systems, Model 6150. Product specifications/datasheet. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2017b. Inclinometer Casing. Model 6500. Product specifications/datasheet review D.2, 01/17. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2017c. Figura original de Geokon Inc. (GEOKON). In: <http://www.geokon.com/6400>, visitado em 2017-10-20 [WWW Document].

GEOKON, 2016a. Model 6150C. MEMS Digital Addressable In-Place Inclinometer. Instruction Manual, revision E 5/16, Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2016b. Model GK-604D. Digital Inclinometer System. Product specifications/datasheet. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2014a. Inclinometer Probe. Model 6000. Instruction Manual. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, NH 03766, USA, 24 pp.

GEOKON, 2014b. MEMS Inclinometer Probe. Model 6100. Instruction Manual. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, NH 03766, USA, 17 pp.

GEOKON, 2014c. 6000, 6100 Series Inclinometer Probes. Product specifications/datasheet, rev. B.4. Geokon Incorporated (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, NH 03766, USA.

GEOKON, 2011. Model 6300: Vibrating Wire In-Place Inclinometer. Instruction Manual, revision 11/11, Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2009a. 6100 MEMS Series. MEMS Inclinometer Systems. Product specifications/datasheet. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, New Hampshire 03766, USA.

GEOKON, 2009b. Inclinometer Readout. Model GK-603. Instruction Manual v3.1. Geokon Inc. (GEOKON), 48 Spencer Street, Lebanon, NH 03766, USA, 79 pp.

GEONOR, 2017. Figura original de RST Instruments, Ltd.; Geonor, Inc. (GEONOR). In: [http://geonor.com/live/wp-content/uploads/2014/10/geonor\\_rst\\_Digital\\_MEMS\\_Inclinometer\\_Spiral\\_Sensor.jpg](http://geonor.com/live/wp-content/uploads/2014/10/geonor_rst_Digital_MEMS_Inclinometer_Spiral_Sensor.jpg), visitado em 2017-11-14.

GEOSYSTEMS, 2010. Inclinometer Probe & Nadir Readout. Model 2200-SG-S200 Series. Product Brochure. Geosystems Australia Pty Ltd (GEOSYSTEMS), 20 William Street East, Lilydale, Victoria, 3140, Australia. In: <http://geosystems.com.au/>, visitado em 2010-08-29.

Gerrard, J.A.F., Perutz, M.F. & Roch, A., 1952. Measurement of the velocity distribution along a vertical line through a glacier. In: Proceedings of the Royal Society of London – Series A, Mathematical and Physical Sciences, 213(1115):546-558.

Ghodssi, R. & Lin, P. (Eds.), 2011. MEMS Materials and Processes Handbook. Stephen D. Senturia, Roger T. Howe and Antonio J. Ricco (series editors), MEMS Reference Shelf. Springer Science+Business Media, New York, Dordrecht, Heidelberg, London, 1224 pp.

Giani, A., Combette, P., Crespy, N., Courteaud, J., Garraud, A., Pascal-Delannoy, F. & Charlot, B., 2009. Frequency response of an accelerometer based on thermal convection. In: Proceedings of

the Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS and MOEMS (DTIP'09). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Rome, Italy, April 1-3, 2009, pp. 113-116.

Giuffredi, F., Zanolini, L. & Foglino, L., 2003. Application of a new integrated multi-parametric monitoring system for the analysis of micro-movements in the Civil Protection activities: An example. Myrvoll, F. (editor), Proceedings of the Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (6th FMGM), 15-18 September 2003, Oslo, Norway. A. A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo, 1:61-66.

Glen, J.W., 1958. The flow law of ice – A discussion of the assumptions made in glacier theory, their experimental foundations and consequences. In: International Association of Scientific Hydrology, 47:171-183.

Glen, J.W., 1952. Experiments on the deformation of ice. In: Journal of Glaciology, International Glaciological Society, 2(12):111-114.

Goodman, 2008. Karl Terzaghi's Legacy in Geotechnical Engineering. GeoStrata, March/April 2008, pp. 32-37. In: <http://www.geoengineer.org/component/k2/item/448-karl-terzaghis-legacy-in-geotechnical-engineering>, visitado em 2017-01-23.

Goodman, R.E., 1999. Karl Terzaghi: The Engineer as Artist. ASCE Press, 1801 Alexander Bell Drive, Reston, Virginia 20191-4400, 340 pp.

GOUDA, 2017. Figura original de Gouda Geo-Equipment, B. V. (GOUDA). In: <https://www.gouda-geo.com/products/instrumentation/no-cat/inclinometer-casing-tubes>, visitado em 2017-11-19 [WWW Document].

Gould, J.P. & Dunncliff, C.J., 1972. Accuracy of field deformation measurements. Proceedings of the 4th Pan American Conference on Soil Mechanics, Puerto Rico, 1:313-366. Republished: Highway Focus, 4(2):8-88. Abstract: <http://trid.trb.org/view/120268>, visitado em 2017-02-13.

Gow, A.J., 1963. Results of measurements in the 309 meter bore hole at Byrd Station, Antarctica. In: Journal of Glaciology, International Glaciological Society, 4(36):771-784.

Green, G.E. & Mikkelsen, P.E., 1988. Deformation Measurements with Inclinometers. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 1169, 15 pp.

Greenaway, A.H., Burnett, J.G., Harvey, A.R., Lloyd, P.A., McBride, R., Russell, P.S.J. & Blanchard, P.M., 2002. Optical Fiber Bend Sensor. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 6,389,187 B1.

Gue, C.Y., Wilcock, M., Alhaddad, M.M., Elshafie, M.Z.E.B., Soga, K. & Mair, R.J., 2015. The monitoring of an existing cast iron tunnel with distributed fibre optic sensing (DFOS). Journal of Civil Structural Health Monitoring 5(5):573-586.

Habel, W.R. & Krebber, K., 2011. Fiber-Optic Sensor Applications in Civil and Geotechnical Engineering. Photonic Sensors, 1(3):268-280.

Haddock, M.H., 1931. Deep borehole surveys and problems. 1st Edition. McGraw-Hill Book Company, Inc., New York and London. 296 pp.

Hernandez, E.N. & Gichard, F.D., 1978. Force Balance Servo Accelerometer. The United States Patent and Trademark Office (USPTO), 600 Dulany Street, Alexandria, Virginia. U. S. Patent No. 4,088,027.

Hiratsuka, R., van Duyn, D.C., Otaredian, T., Sarro, P.M. & de Vries, P., 1992. Design considerations for the thermal accelerometer. Sensors and Actuators A: Physical, 32:380-385.

HOLE, 2017. Figura original de Hole Products (HOLE). In: <http://www.holeproducts.com/products/Shelby-Tubes>, visitado em 2017-10-20 [WWW Document].

- Hui, R. & O'Sullivan, M., 2009. Fiber Optic Measurement Techniques. Elsevier Academic Press, 30 Corporate Drive, Suite 400, Burlington, MA 01803, USA, 4:366-374.
- Hunt, R.E., 2007. Geotechnical Investigation Methods: A Field Guide for Geotechnical Engineers. CRC Press, Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742, 352 pp.
- IEC, 1987a. (radiation) Thermocouple. International Electrotechnical Vocabulary (IEV), reference 845-05-46. International Electrotechnical Commission (IEC). In: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-05-46>, visitado em 2017-05-03.
- IEC, 1987b. (radiation) Thermopile. International Electrotechnical Vocabulary (IEV), reference 845-05-47. International Electrotechnical Commission (IEC). In: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=845-05-47>, visitado em 2017-05-03.
- IEC, 1982. Thermistor. International Electrotechnical Vocabulary (IEV), reference 726-21-08. International Electrotechnical Commission (IEC). In: <http://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=726-21-08>, visitado em 2017-05-03.
- ILAC & OIML, 2007. Guidelines for the determination of calibration intervals of measuring instruments (ILAC-G24/OIML-D10). International Laboratory Accreditation Cooperation (ILAC), Organisation Internationale de Metrologie Legale (OIML), The ILAC Secretariat, c/o NATA, PO Box 7507, Silverwater NSW 2128, Australia, 11 pp.
- IPAC, 2010. Guia para a aplicação da NP EN ISO/IEC 17025 (OGC001). Instituto Português de Acreditação (IPAC), Rua António Gião, 2, 5º, 2829-513, Caparica, Portugal, 21 pp.
- IPQ, 2005a. Sistemas de gestão da medição. Requisitos para processos de medição e equipamento de medição, NP EN ISO 10012. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Rua António Gião, 2, PT-2829-513, Caparica, Portugal.
- IPQ, 2005b. Requisitos gerais de competência para laboratórios de ensaio e calibração, NP EN ISO/IEC 17025. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Rua António Gião, 2, PT-2829-513, Caparica, Portugal.
- IPQ, 1996. Requisitos de garantia da qualidade para o equipamento de medição, Parte 1: Sistema de confirmação metrológica para o equipamento de medição, NP EN 30012-1. Instituto Português da Qualidade (IPQ), Rua C à Avenida dos Três Vales, 2825, Monte da Caparica, Portugal.
- ISO 18674-3, 2016. Geotechnical investigation and testing - Geotechnical monitoring by field instrumentation - Part 3: Measurement of displacements across a line: inclinometers, ISO/DIS 18674-3. International Organization for Standardization (ISO), ISO copyright office, Ch de Blandonnet 8, CP 401, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland.
- ISO & IEC 17025, 2017. General requirements for the competence of testing and calibration laboratories, ISO/IEC FDIS 17025. International Organization for Standardization (ISO), International Electrotechnical Commission (IEC), ISO copyright office, Ch de Blandonnet 8, CP 401, CH-1214 Vernier, Geneva, Switzerland.
- Iten, M., 2011. Novel Applications of Distributed Fiber-optic Sensing in Geotechnical Engineering. A dissertation submitted to ETH Zurich for the degree of Doctor of Sciences. Diss. ETH n° 19632, 282 pp. (Tese de Doutoramento).
- JCGM, 2008a. International vocabulary of metrology - Basic and general concepts and associated terms (VIM). Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 200:2008), 104 pp.
- JCGM, 2008b. Evaluation of measurement data - Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM). Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM 100:2008), 134 pp.
- Jung, H., Kim, C.J. & Kong, S.H., 2007. An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor. Sensors

and Actuators A: Physical, 139:23-30.

Kane, W.F., 1998. Embankment monitoring with time domain reflectometry. Proceedings of the 5th International Conference on Tailings and Mine Waste, Fort Collins, Colorado, U. S. A., 26-28 January, 1998. Colorado State University, Fort Collins, Colorado 80523, USA, 1998, pp. 223-230.

Kane, W.F. & Beck, T.J., 1994. Development of a Time Domain Reflectometry System to Monitor Landslide Activity. In: Burns, S. F. (editor), Proceedings of the 45th Highway Geology Symposium, Portland, Oregon, August 16-20, 1994, pp. 163-173.

Kane, W.F., Beck, T.J., Anderson, N.O. & Perez, H., 1996. Remote Monitoring of Unstable Slopes Using Time Domain Reflectometry. Proceedings of the 11th Thematic Conference and Workshops on Applied Geologic Remote Sensing: practical solutions for real world problems, 27-29 February, 1996, Las Vegas, Nevada, USA. Environmental Research Institute of Michigan, Ann Arbor, Michigan, USA, 1996, 2:431-440.

Kang, I.-S., Jung, H., Kim, D.-S., Kwon, B.-J., Kim, C.J., Kim, W.-J., Choi, S.-Y., Lee, J.-H., Shin, J.-K. & Kong, S.H., 2005. Design and fabrication of a MEMS-based electrolytic tilt sensor. In: Microprocesses and Nanotechnology. Digest of papers (M&N'05). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Tokyo, Japan, October 25-28, 2005, pp. 216-217.

Karim, M.R., 2013. Behaviour of piles subjected to passive subsoil movement due to embankment construction. A simplified 3D analysis. Computers and Geotechnics 53:1-8.

Killeen, P.G., Bernius, G.R. & Mwenifumbo, C.J., 1995. Surveying the path of boreholes: a review of orientation methods and experience. In: Proceedings of the 6th International Minerals and Geotechnical Logging Society (MGLS) Symposium on Borehole Geophysics for Minerals, Geotechnical and Groundwater Applications; Santa Fe, New Mexico (Session VII – Borehole Logging Technology).

Killeen, P.G. & Elliott, B.E., 1996. Surveying the Path of Boreholes: A Review of Developments and Methods Since 1987. In: Proceedings of Exploration 97: Fourth Decennial International Conference on Mineral Exploration, p. 709–712.

Korvink, J.G. & Paul, O. (Eds.), 2006. MEMS: A Practical Guide to Design, Analysis, and Applications. Co-published by William Andrew, Inc., 13 Eaton Avenue, Norwich, 13815 New York; Springer-Verlag GmbH & Co. KG, Tiergartenstrasse 17, D-69129 Heidelberg, Germany, 992 pp.

Lee, J.H. & Lee, S.S., 2011. Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process. Sensors and Actuators A: Physical, 167:1-7.

Lee, J.K., Choi, J.C. & Kong, S.H., 2013. All-Polymer Electrolytic Tilt Sensor with Conductive Poly(dimethylsiloxane) Electrodes. Japanese Journal of Applied Physics, 52(6S), 7 pp.

Lei, G.H., Ai, Y.B. & Shi, J.Y., 2006. The interpretation of pendulum-type inclinometer readings. Canadian Geotechnical Journal, 43(2):210-216.

Leung, A.M., Jones, J., Czyzewska, E., Chen, J. & Pascal, M., 1997. Micromachined accelerometer with no proof mass. In: International Electron Devices Meeting (IEDM). Digest of Technical Papers (IEDM'97). Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Washington D. C., United States, 7-10 December 1997, pp. 899-902.

Leung, A.M., Jones, J., Czyzewska, E., Chen, J. & Woods, B., 1998. Micromachined accelerometer based on convection heat transfer. In: Proceedings of The 11th Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'98). An Investigation of Micro Structures, Sensors, Actuators, Machines and Systems. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Heidelberg, Germany, 25-29 January 1998, pp. 627-630.

Liao, K.-M., Chen, R. & Chou, B.C.S., 2006. A novel thermal-bubble-based micromachined accel-



erometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 130-131:282-289.

Liehr, S., Lenke, P., Wendt, M., Krebber, K., Seeger, M., Thiele, E., Metschies, H., Gebreselassie, B. & Münich, J.C., 2009. Polymer Optical Fiber Sensors for Distributed Strain Measurement and Application in Structural Health Monitoring. *IEEE Sensors Journal*, 9(11):1330-1338.

Liehr, S., Wendt, M. & Krebber, K., 2010. Distributed strain measurement in perfluorinated polymer optical fibres using optical frequency domain reflectometry. *Measurement Science and Technology*, 21(9), 6 pp.

Lin, C.P. & Tang, S.H., 2005. Development and Calibration of a TDR Extensometer for Geotechnical Monitoring. *Geotechnical Testing Journal*, 28(5), 8 pp.

Lin, C.-P., Tang, S.-H., Lin, W.-C. & Chung, C.-C., 2009. Quantification of Cable Deformation with Time Domain Reflectometry – Implications to Landslide Monitoring. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 135(1):143-152.

Lin, S.-S., Liao, J.-C., Chen, J.T. & Chen, L., 2005. Lateral performance of piles evaluated via inclinometer data. *Computers and Geotechnics* 32(6):411-421.

Lindroos, V., Tilli, M., Lehto, A. & Motooka, T., 2010. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. Jeremy Ramsden (series editor), *Micro & Nano Technologies*. William Andrew Applied Science Publishers, an imprint of Elsevier. The Boulevard, Langford Lane, Oxford, OX5-1, Great Britain, United Kingdom; 30 Corporate Road, Burlington, 01803 Massachusetts. First edition, 636 pp.

Liu, S. & Zhu, R., 2017. Micromachined Fluid Inertial Sensors. *Sensors*, 17(2), 24p.

Liu, Y., Dai, Z., Zhou, X., Peng, Z., Li, J., Ou, Z. & Liu, Y., 2011. Optical-fiber stress sensors predict landslides. *SPIE Newsroom*, March 25 2011.

Lovisolò, M., Foglino, L. & Blikra, L.H., 2007. DMS monitoring for early warning at the Åknes rock-slope failure, western Norway. *European Geosciences Union General Assembly 2007*, Vienna, Austria, 15-20 April 2007. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 9, EGU2007-A-06728.

Lovisolò, M., Ghirotto, S., Scardia, C. & Battaglio, M., 2003. The use of Differential Monitoring Stability (DMS) for remote monitoring of excavation and landslide movements. Myrvoll, F. (editor), *Proceedings of the Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (6th FMGM)*, 15-18 September 2003, Oslo, Norway. A. A. Balkema Publishers, Lisse / Abingdon / Exton (PA) / Tokyo, 1:519-524.

Lovisolò, M. & Giusta, A.D., 2005. Precision of D.M.S. columns from real time in-place measurements and improvement in micro-movements analysis with early warning function. Brebbia, C. A. (editor), *Computational Methods and Experimental Measurements XII*, WIT Transactions on Modelling and Simulation. WIT Press, 2005, 41:177-186.

Ma, A.H. & Leung, A.M., 2008. Three-axis Thermal Accelerometer Based on Buckled Cantilever Microstructure. In: *Proceedings of the 7th Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) Conference on Sensors (Sensors'08)*, Lecce, Italy, October 26-29, 2008, pp. 1492-1495.

Machan, G. & Bennett, V.G., 2008. Use of Inclinometers for Geotechnical Instrumentation on Transportation Projects. *State of the Practice*. Transportation Research Circular E-C129. Transportation Research Board, 500 Fifth Street, NW, Washington, DC 20001, 92 pp.

Mailly, F., Giani, A., Martinez, A., Bonnot, R., Temple-Boyer, P. & Boyer, A., 2003a. Micromachined thermal accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 103:359-363.

Mailly, F., Martinez, A., Giani, A., Pascal-Delannoy, F. & Boyer, A., 2003b. Effect of gas pressure on the sensitivity of a micromachined thermal accelerometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 109:88-94.

- Mailly, F., Martinez, A., Giani, A., Pascal-Delannoy, F. & Boyer, A., 2003c. Design of a micromachined thermal accelerometer: thermal simulation and experimental results. *Microelectronics Journal* 34:275-280.
- Malyshev, M.V., 1973. Translated from *Osnovaniya, Fundamenty i Mekhanika Gruntov*, No. 4, pp. 15-16, July-August, 1973. Consultants Bureau, a division of Plenum Publishing Corporation, 227 West 17th Street, New York, N. Y. 10011.
- Marte, R. & Semprich, S., 1998. Untersuchung zur Meßgenauigkeit von Inklinometermessungen. *Bautechnik*, 75(3):155-167.
- Mathews, W.H., 1959. Vertical distribution of velocity in Salmon Glacier, British Columbia. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 3(26):448-454.
- MEASURAND, 2013. ShapeAccelArray. Product Manual. Measurand Inc., 2111 Hanwell Road, Fredericton, NB, Canada, E3C 1M7.
- MEASURAND, 2010. Measurand ShapeAccelArray (SAA) Specifications including a discussion of what they mean. Measurand Inc., 2111 Hanwell Road, Fredericton, NB, Canada, E3C 1M7.
- Measures, R.M., 2001. *Structural Monitoring with Fiber Optic Technology*. Academic Press, A Harcourt Science and Technology Company, 525 B Street, Suite 1900, San Diego, California, 92101-4495, USA. 716 pp.
- Mikkelsen, P.E., 2003. Advances in Inclinator Data Analysis. Myrvoll, F. (editor), *Proceedings of the Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (6th FMGM)*, 15-18 September 2003, Oslo, Norway. A. A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo, 1:555-567.
- Mikkelsen, P.E., 2002. Cement-Bentonite Grout Backfill for Borehole Instruments. *Geotechnical Instrumentation News (GIN)*, 33:38-42.
- Milanovic, V., Bowen, E., Zaghloul, M.E., Tea, N.H., Suehle, J.S., Payne, B. & Gaitan, M., 2000. Micromachined convective accelerometers in standard integrated circuits technology. *Applied Physics Letters*, 76(4):508-510.
- Miller, M.M., 1958. Phenomena associated with the deformation of a glacier bore-hole – Taku Glacier, Alaska. *Extrait des Comptes Rendus et Rapports – Assemblée Générale de Toronto 1957*, Gentbrugge, 4:437-452.
- Moffitt, L.R., 1964. Time Domain Reflectometry Theory and Applications. *Engineering Design News (EDN)*, November, pp. 38-44. In: HP, 1966. *Selected Articles on Time Domain Reflectometry Applications*. Application Note 75 (HP AN75). Hewlett Packard (HP) Inc., 1501 Page Mill Road, Palo Alto, CA 94304, P.C. 94304-1112, Palo Alto, United States, 42 pp.
- Moore, J.R., Gischig, V., Button, E. & Loew, S., 2010. Rockslide deformation monitoring with fiber optic strain sensors. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(2):191-201.
- Moormann, Ch., 2003. A new study on the reliability and quality assurance of inclinometer measurements. Myrvoll, F. (editor), *Proceedings of the Sixth International Symposium on Field Measurements in Geomechanics (6th FMGM)*, 15-18 September 2003, Oslo, Norway. A. A. Balkema Publishers, Lisse/Abingdon/Exton (PA)/Tokyo, 1:575-583.
- Mukherjee, B., Swamy, K.B.M., Krishnan TV, D. & Sem, S., 2014. A simple low cost scheme for closed loop operation of MEMS capacitive accelerometer. *Proceedings of The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), Students' Technology Symposium (TechSim)*, Kharagpur, 2014, pp. 111-115.
- Naterop, D., 1998. Linewise Deformation Measurements for Solving Geotechnical Problems. *Seminar on Development of Geotechnical Tests*. Chinese Association of Geotechnical Investigation,

Beijing, 10 pp.

Newport, 2010. RV Series. High-Performance Precision Rotation Stages. Product Brochure. Newport Corporate, 1791 Deere Avenue, Irvine, California 92606. In: <https://www.newport.com/>, visitado em 2010-07-30.

Ngo, T., 2006. Office Open XML Overview. ECMA International TC45 White Paper. European Computer Manufacturers Association (ECMA), ECMA International, Rue du Rhône 114, CH-1204 Geneva, 14 pp.

Nunes, L. & Sousa, A., 1986. Técnicas de Ensaio, Montagem de Equipamento e Observação de Obras Geotécnicas. Trabalho para a disciplina de Metrologia e Experimentação. Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066 Lisboa, Portugal, 70 pp.

Nye, J.F., 1952a. Reply to Mr. Joel E. Fisher's comments. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 2(11):52-53.

Nye, J.F., 1952b. The mechanics of glacier flow. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 2(12):82-93.

Nye, J.F., 1951. The flow of glaciers and ice-sheets as a problem in plasticity. In: *Proceedings of the Royal Society of London – Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 207(1091):554-572.

O'Connor, K.M. & Dowding, C.H., 2000. Real Time Monitoring of Infrastructure Using TDR Technology: Principles. Federal Highway Administration (FHWA) International Conference on Applications of Geophysical Technologies to Planning, Design, Construction and Maintenance of Transportation Facilities. Missouri Highway and Transportation Department, St. Louis, Missouri, December 11-15, 2000, 11 pp.

O'Connor, K.M. & Dowding, C.H., 1999. GeoMeasurements by Pulsing TDR Cables and Probes. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D. C., 1:1-13.

Olivieri, W., Lovisolo, M. & Crosta, G.B., 2012. Continuous geotechnical monitoring for alert thresholds and hazard management. Eberhardt, E., Froese, C., Turner, K. and Leroueil, S. (editors), *Proceedings of the 11th International Symposium on Landslides and 2nd North American Symposium on Landslides*, 2-8 June 2012, Banff, Alberta, Canada. CRC Press/Balkema, Taylor & Francis Group, London, UK, Volume 2, 6 pp.

Ooi, P.S.K. & Ramsey, T.L., 2003. Curvature and Bending Moments from Inclinator Data. *International Journal of Geomechanics*, 3(1):64-74.

Park, U., Park, B., Moon, I.-K., Kim, D. & Kim, J., 2011. Development of a dual-axis micromachined convective accelerometer with an effective heater geometry. *Microelectronic Engineering* 88:276-281.

Peck, R.B., 1989. Stanley DeWolf Wilson, 1912-1985. In: *Memorial Tributes*, National Academy of Engineering, The National Academies Press, Washington, D. C., 3:355-359.

Peck, R.B., 1972. Observations and Instrumentation: Some Elementary Considerations. Seminar on Field Observations in Foundation Design and Construction. New York Met Section, ASCE. Republished: *Highway Focus*, 4(2):2-5. Abstract: <http://trid.trb.org/view/120267>, visitado em 2017-02-13.

Peck, R.B., 1969. Advantages and limitations of the observational method in applied soil mechanics. In: *Géotechnique*, 19(2):171-187.

Peck, R.B., Hanson, W.E. & Thornburn, T.H., 1974. *Foundation Engineering*. 2nd edition. John Wiley & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 544 pp.

Pei, H.-F., Yin, J.-H., Zhu, H.-H., Hong, C.-Y., Jin, W. & Xu, D.-S., 2012. Monitoring of lateral dis-

placements of a slope using a series of special fibre Bragg grating-based in-place inclinometers. *Measurement Science and Technology*, 23(2), 8 pp.

Perutz, M.F., 1950. Direct measurement of the velocity distribution in a vertical profile through a glacier. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 1(7):382-383.

Perutz, M.F., 1947. The Glacier Physics Committee. In: *Polar Record – Notes and Reviews*, 5(33-34):81-81.

Perutz, M.F., 1940. Mechanism of glacier flow. In: *Proceedings of the Physical Society*, 52(1):132-135.

Petropoulos, A., Moschos, A., Athineos, S. & Kaltsas, G., 2011. A thermal accelerometer directly integrated on organic substrate. *Procedia Engineering*, 25:643-646.

Plinninger, R.J., Alber, M. & Düllmann, J., 2010. The influence of casing and backfilling materials on inclinometer measurements. Williams, A. L., Pinches, G. M., Chin, C. Y., McMorran, T. J. and Massey, C. I. (editors), *Geologically Active: Proceedings of the 11th IAEG Congress*. Auckland, New Zealand, 5-10 September 2010. Taylor & Francis Group, London, CD-ROM:2361-2367.

Puccio, M.R., 2004. Tilting at satellites. *MachineDesign.com*, Penton Corporate. In: <http://machinedesign.com/defense/tilting-satellites>, visitado em 2017-01-18 [WWW Document].

Pyle, J. & Emerald, P., 2002. Convection-Based Technology Offers the Lowest-Cost Accelerometers and Tilt Sensors. *Auto Technology*, 2(6):60-63.

Rocha, L.A., Silva, C.S., Cerqueira, M.F., Ribeiro, J.F., Goncalves, L.M., Pontes, A.J. & Viana, J.C., 2011. A microinjected 3-axis thermal accelerometer. *Procedia Engineering*, 25:607-610.

ROCTEST, 2016. Pisa-M In-Place MEMS Inclinometer. Product specifications/datasheet E5001A-160301. ROCTEST Ltd, 680 Birch Street, St-Lambert, Quebec, Canada J4P 2N3.

RPI, 2010. DP-Series: Horizontal & Vertical Rotary Tables. Product specifications/datasheet. Rotary Precision Instruments UK Ltd (RPI), The Maltings Ind Est/Brassmill La, Bath BA1 3JL. In: <http://www.rpiuk.com>, visitado em 2010-07-21.

RST, 2018. Inclinalysis: Digital Inclinometer Analysis Software Manual. Document number ICM0074G. RST Instruments Ltd. (RST), 11545 Kingston St., Maple Ridge, BC V2X 0Z5 Canada, 69 pp.

RST, 2017. Inclinometer Casing. Product specifications/datasheet. RST Instruments Ltd. (RST), 11545 Kingston St., Maple Ridge, BC V2X 0Z5 Canada. In: <http://www.rstinstruments.com/Brochures/Inclinometer-Casing-ICB0001P.pdf>, visitado em 2017-10-04.

RST, 2010. RST MEMS Digital Inclinometer System Instruction Manual ICM00350, revision 2.5. RST Instruments Ltd. (RST), 200-2050 Hartley Avenue, Coquitlam, B.C. Canada V3K 6W5, 54 pp.

Salgado, F.M., 1995. Instrumentação e observação de aterros sobre solos moles para o desenvolvimento de uma passagem superior em Alverca. Relatório 226/95, Núcleo de Estudos Geotécnicos Especiais (NEGE), Departamento de Geotecnia (DG), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Avenida do Brasil, 101, 1700-066, Lisboa, Portugal, 239 pp.

Salgado, F.M., 1990. Analysis procedures for caisson-retained island type structures. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in the Faculty of Graduate Studies, Department of Civil Engineering. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 611 pp. (Tese de Doutoramento).

Salgado, F.M. & Carvalho, M.R., 1999. Novos desenvolvimentos na interpretação de registos inclinométricos. *Geotecnia - Revista da Sociedade Portuguesa de Geotecnia*, 86:95-110.

- Salgado, F.M. & Carvalho, M.R., 1998. New developments on the interpretation of inclinometer field data. Moore, D. & Hungr, O. (editors), Proceedings of the Eighth International Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment, 21-25 September 1998, Vancouver, Canada. A. A. Balkema, Rotterdam, Brookfield, 8 pp.
- Salgado, F.M., Carvalho, M.R. & Coimbra, L., 2010. Slope factor of safety during road construction. 16th World Road Meeting, 25-28 May 2010, Lisbon, Portugal. International Road Federation (IRF), Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), 6 pp.
- Segura-Castillo, L., Aguado, A. & Josa, A., 2013. Bi-layer diaphragm walls: Experimental and numerical structural analysis. *Engineering Structures* 56:154-164.
- Sharp, R.P., 1953. Deformation of a vertical bore hole in a Piedmont glacier. In: *Journal of Glaciology*, International Glaciological Society, 2(13):182-184.
- Shi, B., Xu, H., Chen, B., Zhang, D., Ding, Y., Cui, H. & Gao, J., 2003. A Feasibility Study on the Application of Fiber-Optic Distributed Sensors for Strain Measurement in the Taiwan Strait Tunnel Project. *Marine Georesources and Geotechnology*, 21(3-4): 333-343.
- Shoup, D., 1992. Sensors in the Real World. Protecting Geotechnical Sensors and Cable from Lightning Damage. Slope Indicator Company White Paper. In: <http://www.slopeindicator.com/pdf/papers/sensors-in-real-world.pdf>, visitado em 2018-04-22.
- Silva, C.S., Dias, R.A., Viana, J.C., Pontes, A.J. & Rocha, L.A., 2012. Static and Dynamic Modeling of a 3-Axis Thermal Accelerometer. *Procedia Engineering* 47:973-976.
- SINCO, 2018. Figura original de Slope Indicator Company (SINCO), a Boart Logyear Group Company. In: <http://www.slopeindicator.com/support/inclinometers/faq-at-system.php>, visitado em 2018-05-23 [WWW Document].
- SINCO, 2014. Digitilt AT System Manual (50330999). Slope Indicator Company (SINCO), Durham Geo-Enterprises, 12123 Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 98275, 37 pp.
- SINCO, 2006a. Digitilt Inclinometer Probe (50302599). Digitilt Probe Manual. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 16 pp.
- SINCO, 2006b. Wheel Replacement Instructions. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 1 pp.
- SINCO, 2004. Guide to Geotechnical Instrumentation. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 52 pp.
- SINCO, 2002. Spiral Sensor (50900199). Product manual. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, 27 pp.
- SINCO, 2001. Data reduction and error correction. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, p. 1-12, 37-39.
- SINCO, 2000. Data reduction and error correction. Slope Indicator Company (SINCO), Harbour Reach Drive, Mukilteo, Washington, USA, p. 13-23, 26-35.
- SINCO, 1997. Figura original de Slope Indicator Company (SINCO), a Boart Logyear Group Company. In: <http://www.slopeindicator.com/pdf/manuals/qc-casing-installation-guide.pdf>, visitado em 2017-10-25.
- SINCO, 1993. Digitilt DataMate and DMM Software. Manual Part No. 50310999. Slope Indicator Company (SINCO), 3668 Albion Place North, PO Box 300316, Seattle, WA 98103-9716 USA, 170 pp.
- SISGEO, 2018. B.r.a.i.n. - Digital Inclinometer System. User Manual EN\_00\_18. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy, 44 pp.

- SISGEO, 2017a. In-Place Inclinometers. Product specifications/datasheet S410. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy.
- SISGEO, 2017b. KLION. Data analysis software for inclinometers and T-REX extensometer. User manual KLION\_EN\_00\_17. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy, 28 pp.
- SISGEO, 2016a. Flush-Coupled Inclinometer Casing. Product specifications/datasheet S141\_EN\_19\_06/2016. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy.
- SISGEO, 2016b. Quick Joint Inclinometer Casing. Product specifications/datasheet S151\_EN\_05\_06/2016. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy.
- SISGEO, 2016c. Red Stripe Self Coupling Inclinometer Casings. Product specifications/datasheet S131\_EN\_13\_06/2016. SISGEO S.R.L., Via F. Serpero 4/F1, 20060 Masate (MI) Italy.
- SISGEO, 2016d. Figura original de SISGEO S.R.L.. In: <http://sisgeo-northamerica.com>, visitado em Julho de 2016.
- SISGEO, 2013a. Vertical Inclinometer Probe. User Manual EN\_01\_13. SISGEO Srl., Via F. Serpero, 4/F1, 20060 MASATE (MI), Italia.
- SISGEO, 2013b. Figura original de SISGEO S.R.L.. In: Inclinometer Casings. User Manual EN\_00\_13. SISGEO Srl., Via F. Serpero, 4/F1, 20060 MASATE (MI), Italia.
- SISGEO, 2011. Inclinometer Probes. Product specifications/datasheet S200 EN, v11. SISGEO Srl., Via F. Serpero, 4/F1, 20060 MASATE (MI), Italia.
- SISGEO, 2010. Inclinometer Casing. Product specifications/datasheet S111\_EN, review 10, 09/10. SISGEO Srl., Via F. Serpero, 4/F1, 20060 MASATE (MI), Italia.
- Smarasekera, L., 1982. Non linear elastic undrained stress-strain model for anisotropically consolidated clay. A thesis submitted in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master of Applied Science in The Faculty of Graduate Studies, Department of Civil Engineering. The University of British Columbia, Vancouver, Canada, 193 pp. (Dissertação de Mestrado).
- Smith, C.S., 1954. Piezoresistance Effect in Germanium and Silicon. *Physical Review*, 94(1):42-49. Abstract: [http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs\\_connect?fforward=http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.94.42](http://adsabs.harvard.edu/cgi-bin/nph-abs_connect?fforward=http://dx.doi.org/10.1103/PhysRev.94.42), visitado em 2017-02-14.
- Snedecor, G.W., 1946. *Statistical Methods Applied to Experiments in Agriculture and Biology*. Fourth Edition, Third Printing. The Iowa State College Press, Ames, Iowa, U.S.A. 485 pp.
- SOIL, 2019. In-Profile Software User Manual. User Manual man\_252, MN1114, rev\_1.1.0. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK, 40 p., in: [http://www.itmsoilsupport.com/manuals/Man252\\_In-Profile\\_Software.pdf](http://www.itmsoilsupport.com/manuals/Man252_In-Profile_Software.pdf), visitado em 2019-01-15.
- SOIL, 2014a. C12 In-Place Inclinometer. Product specifications/datasheet DS0914, v3.1.9. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK.
- SOIL, 2014b. C19-2 Inclined Digital Inclinometer System. Product specifications/datasheet DS0914, v1.0.7. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK.
- SOIL, 2014c. C17 Vertical Digital Inclinometer System. Product specifications/datasheet DS1014, v1.1.0. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK.
- SOIL, 2014d. Digital Inclinometer Pro. User Manual man\_251, MN1114, rev\_1.2.0. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK, 48 pp.
- SOIL, 2014e. Vertical Digital Inclinometer System. User Manual man\_180, MN1114, rev\_1.3.0. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK, 60 pp.

SOIL, 2014f. In-Site Inclinator Data Presentation Software (Dongle Version). User Manual man\_179, rev\_3.1.0. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK, 24 pp.

SOIL, 2014g. C17-Pro Vertical Digital Inclinator System. Product specifications/datasheet DS01114, v1.0.1. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1 QL, UK.

SOIL, 2013. Magnetic Extensometer. User Manual man\_007, rev\_2.1.1. Soil Instruments Ltd. (SOIL), 34 Bell Lane, Uckfield, East Sussex, TN22 1QL, UK, .21 pp.

SOLEXPERTS, 2017. Trivec – Sliding Micrometer – Sliding Deformeter. Linewise measurement of displacement and deformation profiles in geotechnical engineering. Product specifications/datasheet. Solexperts AG, Mettlenbachstrasse 25, Postfach 81, 8617 Mönchaltorf, Switzerland, in: [http://solexperts.com/index.php/en/component/docman/doc\\_download/807-en01geo\\_linewisemeasurv10.html](http://solexperts.com/index.php/en/component/docman/doc_download/807-en01geo_linewisemeasurv10.html), visitado em 2017-09-07.

SOLEXPERTS, 2014. Chain Deflectometer. A Development of the Swiss Federal Institute of Technology, Zurich (ETHZ). Product specifications/datasheet. Solexperts AG, Mettlenbachstrasse 25, Postfach 81, 8617 Mönchaltorf, Switzerland, 2 pp.

SPECTRON, 2009. Dual Axis Electrolytic Tilt Sensors – SP5000 and AU6000 Series. Product specifications/datasheet SDS-117-1409, Spectron Glass and Electronics Inc. (SPECTRON), 595 Old Willets Path, Hauppauge, New York, 11788.

S&T, 2018. Torsion Springs. Springs & Things Inc. (S&T), 1565 Britannia Road East, Unit#17, Mississauga, ON L4W 2V6. In: <http://www.springsandthings.com/pdf/torsion-springs.pdf>, visitado em 2018-05-18.

Stark, T.D. & Choi, H., 2008. Slope inclinometers for landslides. *Landslides*, 5(3):339-350.

Sun, Y., Shi, B., Zhang, D., Tong, H., Wei, G. & Xu, H., 2016. Internal Deformation Monitoring of Slope Based on BOTDR. *Journal of Sensors*, Volume 2016, Article ID 9496285, 8 pp.

Tadigadapa, S. & Mateti, K., 2009. Piezoelectric MEMS sensors: state-of-the-art and perspectives (topical review). *Measuring Science and Technology*, 20(9):1-30.

Talmon, A.M. & Bezuijen, A., 2013. Calculation of longitudinal bending moment and shear force for Shanghai Yangtze River Tunnel: Application of lessons from Dutch research. *Tunnelling and Underground Space Technology* 35:161-171.

TCEE, 2013. Multiplexing. The Columbia Electronic Encyclopedia, Columbia University Press, in: <http://encyclopedia2.thefreedictionary.com/multiplexing>, visitado em 2017-06-12.

TECON, 2017. Figura original de Tecon Group. In: <http://www.tecon-group.eu/index.php/products/geotechnical/inclinometers/inclinometer-casing-anchors-accessories>, visitado em 2017-10-20 [WWW Document].

Terzaghi, K., 1961. Past and Future of Applied Soil Mechanics. Presented at the anual convention of the ASCE, held in Boston at which Professor Terzaghi was presented the first copy of the book “From Theory to Practice in Soil Mechanics”.

Terzaghi, K., 1950. Mechanism of landslides. In: *History of Progress: Selected U.S. Papers in Geotechnical Engineering*, American Society of Civil Engineers Publications, 2003, p. 505-548.

Terzaghi, K., 1943. *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley and Sons, Inc., New York, London, 526 pp.

Terzaghi, K., Peck, R.B. & Mesri, G., 1996. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd edition. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc., New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore. 592 pp.

- TFC, 2017a. 0711-0768-99 – Single Axis, Narrow Angle, Low Current Electrolytic Tilt Sensor. Product specifications/datasheet 0711-0768-99, revision A. The Fredericks Company (TFC), 2400 Philmont Avenue, Huntingdon Valley, Pennsylvania, 19006-0067. In: <http://www.frederickscompany.com>, visitado em 2017-01-18.
- TFC, 2017b. 0737-0101-99 – Single Axis, Linear Output Electrolytic Tilt Sensor. Product specifications/datasheet 0737-0101-99, revision A. The Fredericks Company (TFC), 2400 Philmont Avenue, Huntingdon Valley, Pennsylvania, 19006-0067. In: <http://www.frederickscompany.com>, visitado em 2017-01-18.
- TFC, 2017c. Electrolytic Tilt Sensor Selection and Operation. The Fredericks Company (TFC), 2400 Philmont Avenue, Huntingdon Valley, Pennsylvania, 19006-0067. In: <http://www.frederickscompany.com>, visitado em 2017-01-18 [WWW Document].
- The Observatory, 1950. Glaciology – The flow of glaciers. In: *The Observatory*, 70:63-69.
- Thomson, W., 1856. The Bakerian Lecture – On the electro-dynamic qualities of metals. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 146(3):649-751.
- Thut, A., 1999. Slope Displacement: Geotechnical Measurement and Monitoring. Solexperts AG, Mettlenbachstrasse 25, Postfach 81, 8617 Mönchaltorf, Switzerland, 16 pp.
- Tsang, S.-H., Ma, A.H., Karim, K.S., Parameswaran, A. & Leung, A.M., 2008. Monolithically fabricated polymermems 3-axis thermal accelerometers designed for automated wirebonder assembly. In: *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'08)*, Tucson, Arizona, USA, January 13-17, 2008, pp. 880-883.
- Tweedie, J., 2010. Early borehole survey instrumentation: 1870-1930. In: *GeoDrilling International*, 165:24-26.
- Ueda, H., Ueno, H., Itoigawa, K. & Hattori, T., 2006. Micro capacitive inclination sensor utilizing dielectric nano-particles. In: *Proceedings of the 19th Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE) International Conference on Micro Electro Mechanical Systems (MEMS'06)*, January 22-26, 2006, pp. 706-709.
- Updike, R.G., 1983. Inclinometer strain analyses of anchorage landslides, 1965-80 – Professional Report 80. State of Alaska, Department of Natural Resources, Division of Geological & Geophysical Surveys, Anchorage, Alaska. 142 pp.
- Updike, R.G., Olsen, H.W., Schmoll, H.R., Kharaka, Y.K. & Stokoe II, K.H., 1988. Geologic and geotechnical conditions adjacent to the Turnagain Heights landslide, Anchorage, Alaska – U.S. Geological Survey Bulletin 1817. United States Government Printing Office, Department of the Interior, U. S. Geological Survey, Denver, USA. 41 pp.
- van Reeuwijk, L.P. & Houba, V.J.G., 1998. Basic Statistical Tools. In: van Reeuwijk, L. P. & Houba, V. J. G., *Guidelines for Quality Management in Soil and Plant Laboratories*. FAO Soils Bulletin 74, International Soil Reference and Information Centre (ISRIC), Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Viale delle Terme di Caracalla, 00100 Rome, Italy, ch. 6, 25 pp.
- Vijayaraghavan, G., Brown, M. & Barnes, M., 2004. Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection. Mackay, S. (editor), Newnes, an imprint of Elsevier, Linacre House, Jordan Hill, Burlington, MA 01803, p. 10-11, 102-153.
- Waddington, E.D., 2010. Life, death and afterlife of the extrusion flow theory. In: *Journal of Glaciology, International Glaciological Society*, 56(200):973-996.
- Wang, X., Shi, B., Wei, G. & Chen, S., 2017. An Energy Demodulation Based Fiber Optic Sensing System for Landslide Early-Warning. *Applied Sciences*, 7(7), 10 pp.



WES, 1963. Approach roads – Greenland 1956-1957 Program – Technical Report No. 3-505, Report 2. U. S. Army Engineer Waterways Experiment Station (WES), Corps of Engineers, Vicksburg, Mississippi. 160 pp.

Wheatstone, C., 1843. The Bakerian Lecture – An account of several new instruments and processes for determining the Constants of a Voltaic Circuit. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 133:303-327.

Widzyk-Capehart, E., Hölck, C., Fredes, O., Sanchez, E., Floria, E., Pedemonte, I., Marciniak, M. & Gonzalez, N., 2016. Networked Smart Marker System Mine Scale Trial. Smart Open Pit Deformation Management. CSIRO – Chile International Centre of Excellence in Mining and Mineral Processing. Poster: <http://www.elexonmining.com/emws/wp-content/uploads/2016/05/wireless-in-ground-sensors-1.pdf>, visitado em 2017-09-20.

Wilson, S.D., 1973. Deformation of Earth and Rockfill Dams. In: Hirschfeld, R.C. and Poulos, S.J. (eds.). *Embankment-dam Engineering: Casagrande Volume*. John Wiley and Sons Inc., 111 River Street, Hoboken, New Jersey, New York, USA 07030-6000, pp. 365-417. Abstract: <http://trid.trb.org/view/40460>, visitado em 2017-02-13.

Wilson, S.D., 1970. Observational data on ground movements related to slope instability. Presented at The 6th Terzaghi Lecture, 1969. In: *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, 96(5):1519-1544. Republished: *Journal of Soil Mechanics & Foundations Division*, 1970. Abstract: <http://trid.trb.org/view/124072>, visitado em 2017-02-13.

Wilson, S.D. & Hancock, C.J., 1965. Instrumentation for Movements within Rockfill Dams. ASTM Specification Technical Publication 392, p. 115-130. Abstract: [https://www.astm.org/DIGITAL\\_LIBRARY/STP/PAGES/STP41282S.htm](https://www.astm.org/DIGITAL_LIBRARY/STP/PAGES/STP41282S.htm), visitado em 2017-02-13.

Wilson, S.D. & Mikkelsen, P.E., 1978. Field Instrumentation. In: Schuster, R. L. and Krizek, R. I.. *Landslides: Analysis and Control*. Transportation Research Board (TRB), Commission on Sociotechnical Systems, National Research Council, Special Report 176. National Academy of Sciences, Washington, D. C., 5:112-138.

Woschitz, H. & Brunner, F.K., 2008. Monitoring a Deep-seated Mass Movement Using a Large Strain Rosette. 13th FIG Symposium on Deformation Measurement and Analysis, 4th IAG Symposium on Geodesy for Geotechnical and Structural Engineering, Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), Lisboa, Portugal, 2008, 12 a 15 Maio, 10 pp.

Wu, C. & Grace, R.H., 2013. Thermally-Based MEMS Sensors (Part 2). *Commercial Micro Manufacturing International (CMM)*, 6(4):44-48.

Wu, J., 2002. Sensing and Control Electronics for Low-Mass Low-Capacitance MEMS Accelerometers. A dissertation submitted in partial satisfaction of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical and Computer Engineering in the Carnegie Institute of Technology of the Carnegie Mellon University, 225 pp. (Tese de Doutorado).

Yazdi, N., Ayazi, F. & Najafi, K., 1998. Micromachined Inertial Sensors. *Proceedings of The Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)*, 86(8):1640-1659.

Yin, Y., Wang, H., Gao, Y. & Li, X., 2010. Real-time monitoring and early warning of landslides at relocated Wushan Town, the Three Gorges Reservoir, China. *Landslides*, 7(3):339-349.

Yotter, R.A., Baxter, R.R., Ohno, S., Hawley, S.D. & Wilson, D.M., 2003. On a micromachined fluidic inclinometer. In: *The 12th International Conference on Solid State Sensors, Actuators and Microsystems*, Boston, June 8-12, 2003. Volume 2, pp. 1279-1282.

Yu, F.T.S. & Yin, S., 2002. Distributed Fiber Optic Sensors. In: Yu, F. T. S. and Yin, S. (editors), *Fiber Optic Sensors*. Marcel Dekker Inc., 270 Madison Avenue, New York, NY 10016, 5:183-233.

Zhu, H., 2009. Fiber Optic Monitoring and Performance Evaluation of Geotechnical Structures. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the Degree of Doctor of Philosophy. The Hong Kong Polytechnic University, Department of Civil and Structural Engineering, 312 pp. (Tese de Doutorado).

Zhu, Z.-W., Yuan, Q.-Y., Liu, D.-Y., Liu, B., Liu, J.-C. & Luo, H., 2014. New improvement of the combined optical fiber transducer for landslide monitoring. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8):2079-2088.

Zion, H., 2007. Metrology Concepts:  $k=3.9?$ ... Why Not?? In: Wolff, C. and Puryear, S. (editors), *Measurement Science Conference (MSC)*, Long Beach Convention Center, Long Beach, California, January 22-26, 54 pp.



**ANEXOS**



## ÍNDICE DE ANEXOS

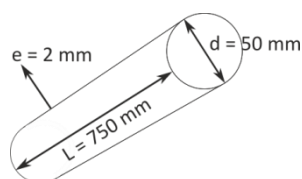
ANEXO I: OUTROS PARÂMETROS A CONSIDERAR NA SELEÇÃO DE UMA MESA ROTATIVA PARA EFEITOS DE CALIBRAÇÃO INCLINOMÉTRICA (Coimbra, 2011).....	221
ANEXO II: EXTRAÇÃO DE VALORES DE ERRO TÍPICO A PARTIR DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS .....	225
ANEXO III: ENSAIOS INCLINOMÉTRICOS LABORATORIAIS: DIVERGÊNCIAS ENTRE INSTRUMENTOS E ESTABILIDADE DAS LEITURAS EM FUNÇÃO DA MAGNITUDE DA INCLINAÇÃO .....	229
ANEXO IV: DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE INSTRUMENTAL DE SISTEMAS INCLINOMÉTRICOS ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS COMPARATIVOS .....	247
ANEXO V: DISTORÇÃO MÁXIMA DE TUBOS INCLINOMÉTRICOS EM CONDIÇÕES DE “CORTE PLENO”. CASO DE OBRA DEMONSTRATIVO, VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONCEITO E ELEMENTOS DE CÁLCULO ADICIONAIS .....	257
ANEXO VI: CORREÇÃO DE ERROS DE ALTERAÇÃO DO DESVIO NA ORIGEM. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	265
ANEXO VII: CORREÇÃO DE ERROS DE ROTAÇÃO. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	283
ANEXO VIII: CORREÇÃO DE ERROS DE PROFUNDIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	291
ANEXO IX: CORREÇÃO DE ERROS DE SENSIBILIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA .....	299
ANEXO X: DERIVA SISTEMÁTICA DO DESVIO NA ORIGEM EM PROFUNDIDADE DEVIDO AO INGRESSO DE ÁGUA NA SONDA INCLINOMÉTRICA .....	305
ANEXO XI: CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS PONTUAIS. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASOS DE OBRA .....	319
ANEXO XII: ESTIMATIVA DO ERRO EM CURVAS DE PERFIL .....	331



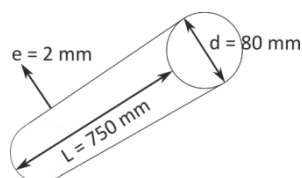
## ANEXO I: OUTROS PARÂMETROS A CONSIDERAR NA SELEÇÃO DE UMA MESA ROTATIVA PARA EFEITOS DE CALIBRAÇÃO INCLINOMÉTRICA (Coimbra, 2011)

### Estimativa da carga de referência para seleção da mesa rotativa

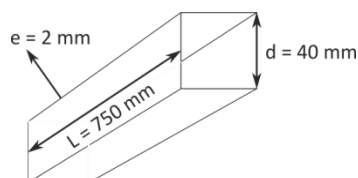
- Carga da sonda inclinométrica<sup>1</sup>: 2 kgf
- Carga adicional da porção de cabo suspenso<sup>2</sup>: 0,5 kgf
- Carga adicional do sistema de fixação do cabo<sup>3</sup>: 2 kgf
- Material de construção dos acessórios de fixação: alumínio ( $\gamma \cong 27 \text{ kN/m}^3$ )
- Comprimento de tubo inclinométrico para ensaio/calibração:  $L = 750 \text{ mm}$
- Carga dos tubos inclinométricos para ensaio/calibração:



$$W = L\pi d e \gamma \cong 0,64 \text{ kgf (ensaio)}$$

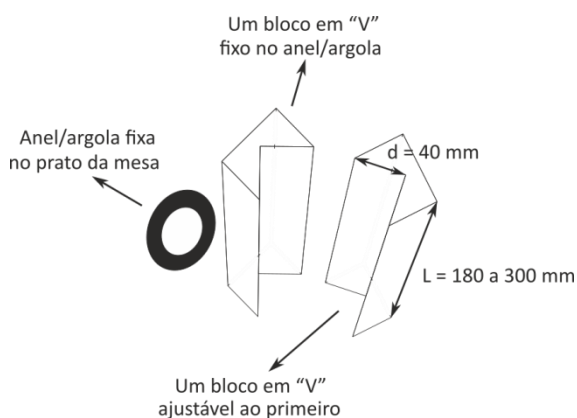


$$W = L\pi d e \gamma \cong 1,02 \text{ kgf (ensaio)}$$



$$W = 4Ld e \gamma \cong 0,65 \text{ kgf (calibração)}$$

- Apoios e suportes:



- Apenas sugestivo. Pormenores a dimensionar em função da mesa selecionada.
- Em vez de dois blocos em "V", pode utilizar-se apenas um com outra solução de fixação do instrumento ou do tubo.
- Em vez de um anel, pode encontrar-se outra solução de fixação à mesa.
- $W \cong 2 \text{ kgf}$  (um bloco em "V" terá cerca de 0,6 kgf).

<sup>1</sup> Valor máximo dos pesos de sonda recolhidos de vários catálogos de produto.

<sup>2</sup> Sobredimensionado a partir dum metro de cabo suspenso.

<sup>3</sup> Sobredimensionado com base no peso do sistema de roldana + mordentes.

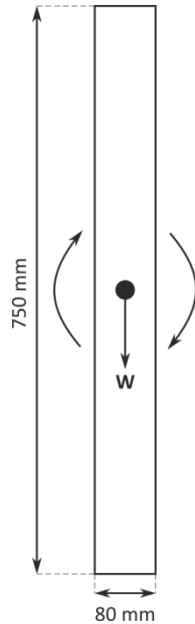


- Carga total<sup>1</sup>:

$$W_t = W_{sonda} + W_{cabo} + W_{tubo} + W_{fixação} + W_{suportes} = 7,52 \text{ kgf} \cong 10 \text{ kgf}$$

#### Estimativa dos momentos de referência para seleção da mesa rotativa

- Momento de inércia ( $I$ ) e raio de giração ( $k$ ):

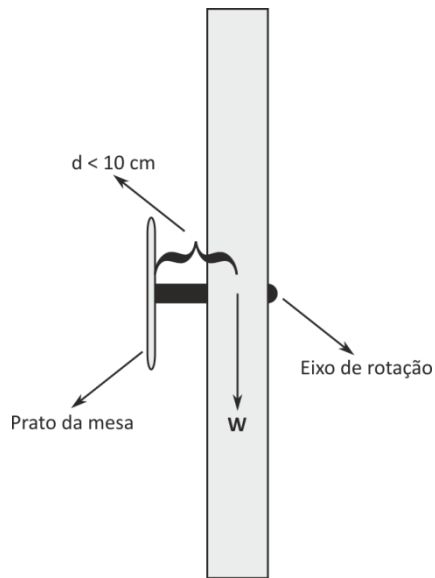


- O sistema pode ser simplificado considerando-se o conjunto como um cilindro com massa 10 kgf.
- $I = mk^2$  (qualquer corpo).
- $I = m(L^2/12 + D^2/16)$  (cilindro maciço).
- $k = \sqrt{750^2/12 + 80^2/16} \cong 217 \text{ mm} \Rightarrow I = 10 \times 0,22^2 \cong 0,5 \text{ kgf/m}^2$
- A carga encontra-se mais concentrada no centro durante o processo de calibração e ligeiramente descentralizada num ensaio em que se utilize o sistema de roldana + mordentes para fixação do cabo.

O momento de inércia nem sempre é especificado. Neste caso a aceleração admissível deve ser verificada em função da capacidade de torque que a mesa possui (in ex.:  $\alpha = \tau/I$ , sendo  $\alpha$  a aceleração angular e  $\tau$  o torque necessário). No entanto, as velocidades e as acelerações envolvidas neste tipo específico de aplicação são muito baixas, pelo que qualquer mesa com a capacidade de carga radial necessária deverá ter tração suficiente, a não ser que especifique um momento de inércia impeditivo.

<sup>1</sup> Sobredimensionado por segurança.

- Momento fletor ( $M_c$ ):



- O sistema pode ser simplificado considerando-se toda a carga uniformemente distribuída no cilindro.
- Considera-se que o sistema de fixação não distancia mais de 10 *cm* o centro de massa do conjunto do prato da mesa.
- $M_c = mgd = 10 \times 9,81 \times 0,10 \cong 9,81 \text{ Nm}$
- O sistema de fixação da carga deslocará ligeiramente o centro de massa do conjunto para junto do prato.

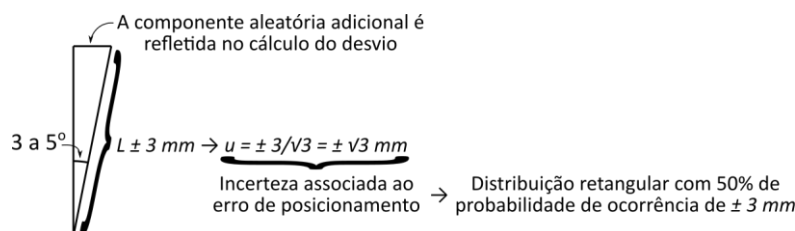
O momento fletor nem sempre se encontra especificado. Neste caso, a distância máxima da carga ao prato pode determinar-se através do momento de inércia admissível ou através de ábacos de desempenho.



## ANEXO II: EXTRAÇÃO DE VALORES DE ERRO TÍPICO A PARTIR DE ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS

### Observações gerais

- As especificações técnicas são frequentemente omissas quanto ao objeto dos valores especificados, podendo-se referir a uma leitura ou a uma medição (in ex.: diferença média de duas leituras simétricas). Este facto só pode ser determinado através da análise de dados. Nesta secção extraem-se os valores de erro típico partindo-se do princípio que as especificações se referem a uma medição.
- Mediante o uso dum sistema de fixação do tipo *roldana + mordentes*, a repetibilidade especificada para o sensor pode ser muito inferior ao erro aleatório típico do sistema. Este facto deriva do erro de posicionamento. Sabendo-se que o erro de posicionamento admissível é de  $\pm 3 \text{ mm}$  e que a inclinação máxima recomendada se situa no intervalo  $3 - 5^\circ$ , a componente aleatória adicional será  $\sqrt{3} \sin(3^\circ)$  a  $\sqrt{3} \sin(5^\circ)$ , ou seja  $0,09 - 0,15 \text{ mm}$ :



- Independente dos valores de erro especificados, a maioria dos inclinómetros apresenta valores de erro aleatório típico no intervalo  $0,1 - 0,2 \text{ mm}$ , uma vez que valores inferiores incorrem normalmente na sinalização frequente de pequenos erros sistemáticos. Este facto pode ser aferido através dos perfis de somas obtidos de dados de obra ou de verificação metrológica em instalações concebidas para o efeito.

### Resolução e repetibilidade do sensor e do sistema em unidades métricas

- Especificações técnicas (SISGEO, 2011):
  - o Constante instrumental:  $k = 20000$
  - o Passo de leitura:  $L = 500 \text{ mm}$
  - o Resolução:  $0,025/L \text{ mm} \Rightarrow 1 \text{ un} = L/k = 0,025 \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sensor:  $\varepsilon_a^A = \pm 0,050/L \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sistema:  $|\varepsilon_a^A| + |\varepsilon_s| = 3 \text{ mm}/30 \text{ m}$
- Erro típico do sistema<sup>1</sup>:
  - o 
$$\begin{cases} \sqrt{\frac{30}{L}} \varepsilon_a^A + \frac{30}{L} \varepsilon_s = \pm 3 \text{ mm}; L = 0,5 \text{ m} \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,05 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon_s \cong \pm 0,044 \text{ mm} \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,050 \text{ mm} \end{cases}$$

<sup>1</sup> É mais comum aplicar-se a precisão centesimal a unidades milimétricas. Contudo, neste caso opta-se por exprimir o resultado com precisão milimétrica porque é desta forma que o fabricante especifica as características metrológicas do produto.

- Conversão de unidades:
  - o  $\begin{cases} \varepsilon_a^A = \pm 0,044/0,025 \cong 2 \text{ un} \\ \varepsilon_s = \pm 0,050/0,025 = 2 \text{ un} \end{cases}$
  - o  $\varepsilon_a^B \cong \pm 2\varepsilon_a^A = \pm 4 \text{ un}$

#### **Repetibilidade do sensor em percentagem da amplitude de medição (*full-scale*)**

- Especificações técnicas (DGS, 2013c):
  - o Amplitude de medição:  $\pm 30^\circ$  (calibrada);  $\pm 53^\circ$  (mensurável)
  - o Constante instrumental:  $k = 25000$
  - o Passo de leitura:  $L = 500 \text{ mm}$
  - o Resolução<sup>1</sup>:  $0,01/L \text{ mm} \Rightarrow 1 \text{ un} = L/k = 0,02 \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sensor:  $\varepsilon_a^A = \pm 0,01\% FS \Rightarrow \pm 500 \sin(53 \times 0,01/100) \cong \pm 0,04 \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sistema:  $|\varepsilon_a^A| + |\varepsilon_s| = 6 \text{ mm}/25 \text{ m}$
- Erro típico do sistema:
  - o  $\begin{cases} \sqrt{\frac{25}{L}} \varepsilon_a^A + \frac{25}{L} \varepsilon_s = \pm 6 \text{ mm}; L = 0,5 \text{ m} \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,04 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} \varepsilon_s \cong \pm 0,11 \text{ mm} \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,04 \text{ mm} \end{cases}$
- Conversão de unidades:
  - o  $\begin{cases} \varepsilon_a^A = \pm 0,04/0,02 \cong 2 \text{ un} \\ \varepsilon_s = \pm 0,11/0,02 \cong 6 \text{ un} \end{cases}$
  - o  $\varepsilon_a^B \cong \pm 2\varepsilon_a^A = \pm 4 \text{ un}$

Visto que este modelo de instrumento é normalmente utilizado com *roldana + mordentes*, será mais prudente estimar os valores de erro considerando  $\varepsilon_a^A = \pm \sqrt{0,04^2 + 0,12^2} \cong \pm 0,13 \text{ mm} \cong \pm 7 \text{ un}$ , sendo 0,12 o valor intermédio da incerteza associada ao erro de posicionamento (in ex.: 0,09 – 0,15 mm). Desta forma, obtêm-se os valores  $\varepsilon_s = \pm 5 \text{ un}$  e  $\varepsilon_a^B \cong \pm 14 \text{ un}$ .

Note-se que os valores obtidos acima são ligeiramente inferiores aos recomendados pelo fabricante (6.3.3). Este facto advém da consideração do valor intermédio da componente aleatória adicional (in ex.:  $\pm 0,12 \text{ mm}$ ), tendo-se optado por ignorar outras fontes de informação conhecidas acerca do erro aleatório típico deste sistema. Valores de erro idênticos aos recomendados pelo fabricante obtêm-se considerando a componente adicional máxima com arredondamento<sup>2</sup> decimal da componente aleatória do erro típico (in ex.:  $\pm 0,15 \text{ mm} \rightarrow \varepsilon_a^A = \pm \sqrt{0,04^2 + 0,15^2} \cong \pm 0,2 \text{ mm} = \pm 10 \text{ un}$ ).

<sup>1</sup> Embora as especificações técnicas refiram uma resolução de 0,01 mm, sabe-se que, neste caso, este valor pressupõe uma medição obtida a partir de duas leituras de 1 un. Considera-se que este pressuposto é incorreto, uma vez que exclui a possibilidade de medir um valor nulo. Por esta razão atribui-se o valor métrico associado a uma unidade de leitura, o qual se obtém pela razão  $L/k$ .

<sup>2</sup> As políticas de arredondamento dos valores apresentados pelos fabricantes são muito frequentemente inconsistentes. Por esta razão, sabe-se que pequenas diferenças de magnitude se devem muito provavelmente a diferenças de arredondamento. A título de exemplo, Mikkelsen (2003) refere que a componente aleatória do sistema DGS (2013c) é  $\pm 0,16 \text{ mm}$  e as especificações técnicas do mesmo sistema apresentam o mesmo valor arredondado à décima (in ex.:  $\pm 0,2 \text{ mm}$ ).

### Repetibilidade do sensor em unidades angulares

- Especificações técnicas (DGSI, 2014b):
  - o Constante instrumental:  $k = 100000$
  - o Passo de leitura:  $L = 500 \text{ mm}$
  - o Resolução:  $0,005/L \text{ mm} \Rightarrow 1 \text{ un} = L/k = 0,005 \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sensor:  $\varepsilon_a^A = \pm 0,003^\circ \Rightarrow \pm 500 \sin(0,003) \cong \pm 0,026 \text{ mm}$
  - o Repetibilidade do sistema<sup>1</sup>: até 4 vezes a repetibilidade do sensor
- Erro típico do sistema<sup>2</sup>:
  - o  $\begin{cases} 2\varepsilon_a^A \leq |\varepsilon_a^A + \varepsilon_s| \leq 4\varepsilon_a^A \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,026 \text{ mm} \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} 0,026 \leq |\varepsilon_s| \leq 0,078 \text{ [mm]} \\ \varepsilon_a^A = \pm 0,026 \text{ mm} \end{cases}$
- Conversão de unidades:
  - o  $\begin{cases} \varepsilon_a^A = \pm 0,026/0,005 \cong 5 \text{ un} \\ 5 \leq |\varepsilon_s| \leq 16 \text{ [un]} \end{cases}$
  - o  $\varepsilon_a^B \cong \pm 2\varepsilon_a^A = \pm 10 \text{ un}$

Note-se que, neste caso, o fabricante opta por definir um intervalo de valores aceitáveis para o erro típico em detrimento dum valor específico. Esta opção justifica-se, por exemplo, pela influência que a qualidade das instalações pode ter na estabilização das leituras. Caberá à equipa de trabalho estabelecer intervalos de confiança adequados ao desempenho instrumental verificado e às exigências impostas pelo plano de observação geotécnica.

---

<sup>1</sup> Para efeitos de demonstração e com base nos valores tipicamente obtidos de outros sistemas inclinométricos, considera-se que a repetibilidade do sistema é 2 a 4 vezes superior à repetibilidade do sensor.

<sup>2</sup> É mais comum aplicar-se a precisão centesimal a unidades milimétricas. Contudo, neste caso opta-se por exprimir o resultado com precisão milimétrica porque é desta forma que o fabricante especifica as características metrológicas do produto.



### ANEXO III: ENSAIOS INCLINOMÉTRICOS LABORATORIAIS. DIVERGÊNCIAS ENTRE INSTRUMENTOS E ESTABILIDADE DAS LEITURAS EM FUNÇÃO DA MAGNITUDE DA INCLINAÇÃO

#### Objetivos

- Estudar o comportamento da dispersão das medições inclinométricas em função da inclinação imposta;
- estudar o comportamento das medições inclinométricas em função da inclinação imposta;
- comparar os resultados obtidos por instrumentos com estados de calibração diferentes;
- estimar o desvio na origem, a dispersão e a variação respetivas, em função da inclinação imposta;
- estudar a influência do desvio na origem nas medições inclinométricas;

#### Equipamentos utilizados

Foram ensaiados 7 inclinómetros do tipo DGSI (2013c), todos com o mesmo cabo e com a mesma unidade de aquisição. Estes instrumentos foram identificados pelas siglas A3, A4, A7, B1, B2, B3 e B4. As características metrológicas são as seguintes:

- Amplitude de medição:  $\pm 30^\circ$  (calibrada);  $\pm 53^\circ$  (mensurável)
- Constante instrumental:  $k = 25000$
- Passo de leitura:  $L = 500 \text{ mm}$
- Resolução:  $0,02 \text{ mm/un}$
- $\varepsilon_a^A = \pm 0,2 \text{ mm} = \pm 10 \text{ un}$  (com roldana + mordentes)
- $\varepsilon_a^A = \pm 0,04 \text{ mm} = \pm 2 \text{ un}$  (repetibilidade do sensor, 0,01% FS)
- $\varepsilon_a^B \cong 2\varepsilon_a^A = \pm 0,4 \text{ mm} = \pm 20 \text{ un}$  (com roldana + mordentes)
- $\varepsilon_a^B \cong 2\varepsilon_a^A = \pm 0,08 \text{ mm} = \pm 4 \text{ un}$  (repetibilidade do sensor, 0,01% FS)
- $\varepsilon_s = \pm 0,1 \text{ mm} = \pm 5 \text{ un}$

Os ensaios laboratoriais foram executados num aparato com rotação unidimensional ajustável, composto por um troço de tubo inclinométrico acoplado numa tábua com oscilação lateral do tipo pendular (Figura A1). O aparato não inclui um meio fiável de fixação da inclinação, pelo que foram utilizadas garras de aperto para garantir a estabilidade. Este aparato foi concebido pelo Eng. Arlindo de Sousa, Técnico Superior do NGUT/DG/LNEC, e executado pela equipa técnica do NGUT. Mais recentemente procedeu-se a uma remodelação deste equipamento (Anexo IV).





a) Vista integral.



b) Fixação do aparato em inclinações reduzidas.



c) Fixação do aparato em inclinações acentuadas.

Figura A1 – Aparato laboratorial de verificação inclinométrica.

### Metodologias de ensaio

O plano de trabalhos foi concebido pelo Bolseiro Luís Coimbra e a execução coube ao próprio com assistência da Bolseira Cláudia Henriques. Os procedimentos aplicados foram os seguintes:

- Definição de uma série de inclinações alvo aproximadas e recolha de uma série de medi-

ções inclinométricas em cada inclinação alvo:

1. Posicionamento e fixação do aparato na inclinação alvo.
  2. Com cada instrumento, recolha de 8 leituras em cada sentido (in ex.: 32 registos) pela seguinte ordem<sup>1</sup>:
    - 2.1) *A0 Principal ( $A0^P$ ) e B0 Transversal ( $B0^T$ );*
    - 2.2) *A180 Principal ( $A180^P$ ) e B180 Transversal ( $B180^T$ );*
    - 2.3) *B0 Principal ( $B0^P$ ) e A0 Transversal ( $A0^T$ );*
    - 2.4) *B180 Principal ( $B180^P$ ) e A180 Transversal ( $A180^T$ ).*
  3. Repetição dos procedimentos na inclinação alvo seguinte.
- As inclinações alvo definidas foram 1°, 3°, 5°, 10°, 15°, 20° e 25°.
  - O controlo<sup>2</sup> das inclinações alvo fez-se com um clinómetro mecânico unidirecional *Wylér Clinometer 80*, apoiado diretamente no tubo inclinométrico. Estas medições executaram-se em pares, após a fixação de cada inclinação alvo e no final de cada série de medições inclinométricas (in ex.: duas medições clinométricas adicionais por cada instrumento inclinométrico).

#### **Medições clinométricas: estabilidade do aparato**

No Quadro A1 apresenta-se o resumo das medições clinométricas obtidas durante os ensaios estáticos. A medição correspondente a cada inclinação alvo corresponde ao valor médio de 16 medições clinométricas, obtidas ao longo do ensaio, conforme descrito acima. O erro associado a cada valor médio corresponde ao desvio padrão respetivo, majorado pelo valor crítico da distribuição bicaudal *t-Student* com 15 graus de liberdade.

De acordo com os objetivos pretendidos destes ensaios, considera-se que as inclinações obtidas são satisfatórias. Relativamente aos valores de dispersão respetivos, considera-se que estes deverão ser compatíveis com o erro de medição especificado pelo fabricante do clinómetro. Sabendo-se que o erro especificado é de  $\pm 1,5 \text{ min} \cong \pm 0,03^\circ$ , verifica-se que as dispersões obtidas se enquadram com esta estimativa.

O valor  $R^2$  corresponde ao quadrado do coeficiente de correlação linear entre o grupo de medições associado ao valor médio respetivo e o índice das mesmas, pela mesma ordem em que foram executadas. Não se verificando qualquer valor de  $R^2$  significativo, conclui-se que as inclinações impostas se mantiveram estáveis no decorrer dos ensaios de todas as inclinações alvo.

---

<sup>1</sup> *Principal*: direção de oscilação pendular (in ex.: inclinação imposta); *Transversal*: direção sem oscilação pendular (in ex.: com inclinação constante).

<sup>2</sup> Note-se que os objetivos das medições clinométricas foram apenas o posicionamento do aparato na vizinhança da inclinação alvo e a avaliação da estabilidade da inclinação definida no decurso dos ensaios.

Quadro A1 – Medições clinométricas obtidas no decorrer dos ensaios laboratoriais.

<sup>1</sup> Inclinação alvo [grau]	Medição clinométrica [grau]		R <sup>2</sup>	Desvio na origem [min]	
1	0,93	±0,02	0,13	-8,79	±1,04
3	2,87	±0,01	0,00	-8,68	±0,82
5	5,13	±0,01	0,29	-8,49	±0,7
10	10,10	±0,02	0,02	-8,61	±1,1
15	15,05	±0,01	0,03	-8,44	±0,72
20	20,00	±0,01	0,03	-8,88	±0,51
25	24,86	±0,02	0,05	-8,73	±0,63

<sup>1</sup>Foram excluídas 2 medições da inclinação alvo 1° por apresentarem valores muito desenquadrados.

No Quadro A1 apresentam-se também os valores médios do desvio na origem de cada ensaio, juntamente com o desvio padrão respetivo majorado pelo valor crítico da distribuição bicaudal *t-Student* com 15 graus de liberdade. Sabendo-se que o clinómetro utilizado admite até 1° de desvio na origem, confirma-se a operação do clinómetro dentro do intervalo de valores recomendados pelo fabricante. As dispersões dos desvios na origem enquadram-se com os valores homólogos das inclinações, pelo que também se consideram aceitáveis.

### Dispersão das medições inclinométricas

Nas figuras A2 e A3 apresentam-se as dispersões das medições inclinométricas nas direções *A* e *B*, respetivamente. Os valores de dispersão apresentados correspondem ao desvio padrão majorado pelo valor crítico da distribuição bicaudal *t-Student* com 7 graus de liberdade.

Nas mesmas figuras encontram-se demarcados os valores máximos do erro esperado ( $\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_s$ ) e da componente aleatória respetiva ( $\varepsilon_a$ ). A componente aleatória utilizada baseia-se nas especificações do sensor (in ex.: 0,01% FS; FS = 53°; Anexo II), uma vez que o troço de tubo é retilíneo e o sistema de fixação utilizado não é do tipo *roldana + mordentes*.

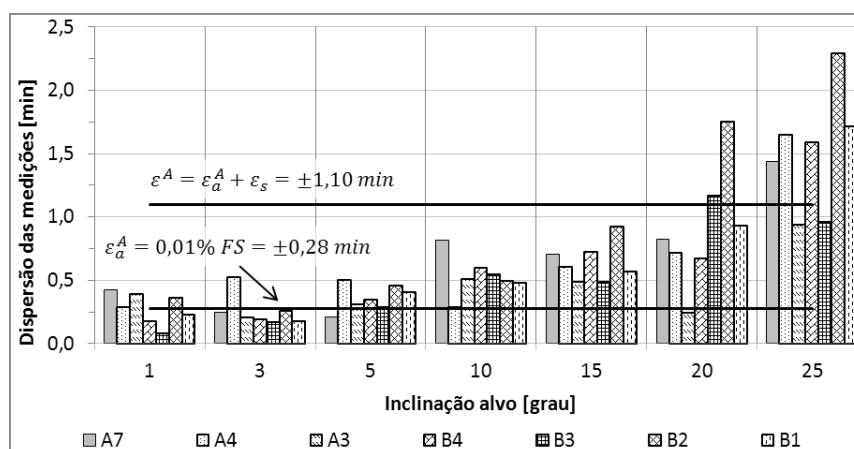


Figura A2 – Dispersão das medições inclinométricas da direção *A*.

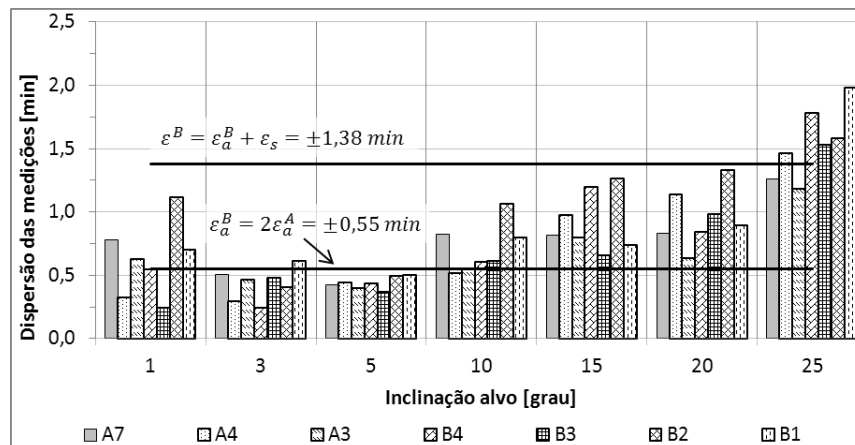


Figura A3 – Dispersão das medições inclinométricas da direção *B*.

Nas figuras A2 e A3 observa-se o seguinte:

- De um modo geral, a repetibilidade das medições inclinométricas diminui em função do aumento da inclinação. Ou seja, instalações com maior inclinação poderão apresentar maior variabilidade do que a esperada. Esta observação confirma as conclusões de Marte & Semprich (1998).
- De facto, as medições da direção *B* apresentam variabilidade superior à das medições da direção *A*, mas as diferenças esbatem-se para inclinações superiores a 5°. Provavelmente, a partir de determinada inclinação na direção *B* o peso próprio da sonda promove menor oscilação lateral das rodas no interior das calhas. Embora se tratem de ensaios estáticos<sup>1</sup>, considera-se que seja possível a ocorrência do mesmo fenómeno em obra.
- Em inclinações superiores a 5°, a grande maioria das dispersões ultrapassa o limite máximo da componente aleatória  $\varepsilon_a$ . Os resultados são mistos e inconclusivos em inclinações inferiores. Considera-se que a inadequação do valor máximo de  $\varepsilon_a$  em inclinações inferiores a 5° poderá dever-se a) ao défice de precisão do aparato para o nível de rigor pretendido<sup>2</sup> ou b) à inaptidão da repetibilidade do sensor especificada para definir este tipo de limite<sup>3</sup>.
- O valor de erro máximo que contempla  $\varepsilon_s$  é adequado até cerca de 20° de inclinação, mas permanece a incerteza sobre o facto das medições que se encontram entre os dois limites conterem, ou não, erros sistemáticos.

Face aos resultados obtidos, convém verificar se o aumento das dispersões se deve à existência de uma deriva das medições em cada inclinação alvo. Nos quadros A2 e A3 apresentam-se, nas direções *A* e *B*, respetivamente, os valores de  $R^2$  correspondentes a uma correlação linear entre as medições de cada ensaio e o índice das mesmas, pela mesma ordem em que foram executadas. Estes quadros demonstram a ocorrência frequente de valores elevados de  $R^2$ , principalmente em inclinações acima de 3 – 5°. Embora as ocorrências não sejam comuns à totalidade dos instru-

<sup>1</sup> Ou seja, sem movimento da sonda no interior do tubo.

<sup>2</sup> Devido, por exemplo, a oscilações laterais ou deficiências relacionadas com o sistema de fixação do cabo e com tubo inclinométrico.

<sup>3</sup> Devido, por exemplo, à ausência de contribuições relacionadas com as rodas e com as molas respetivas.

mentos e nem sempre se apresentem persistentes, é possível que o aumento das dispersões se deva a fenômenos de deriva instrumental.

Quadro A2 – Quadrado dos coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) entre as dispersões das medições inclinométricas na direção  $A$  e os índices das mesmas.

Inclin. alvo	Instrumento						
	B1	B2	B3	B4	A3	A4	A7
1	0,31	0,23	0,00	0,00	0,24	0,00	0,38
3	0,67	0,23	0,71	0,69	0,07	0,74	0,76
5	0,79	0,70	0,50	0,93	0,57	0,80	0,01
10	0,93	0,84	0,42	0,87	0,95	0,03	0,89
15	0,01	0,94	0,63	0,97	0,86	0,76	0,88
20	0,97	0,87	0,52	0,89	0,43	0,69	0,92
25	0,98	0,98	0,13	0,94	0,95	0,57	0,98

Quadro A3 – Quadrado dos coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) entre as dispersões das medições inclinométricas na direção  $B$  e os índices das mesmas.

Inclin. alvo	Instrumento						
	B1	B2	B3	B4	A3	A4	A7
1	0,04	0,00	0,01	0,19	0,51	0,22	0,00
3	0,48	0,05	0,03	0,54	0,24	0,41	0,30
5	0,10	0,15	0,23	0,77	0,09	0,08	0,03
10	0,84	0,38	0,59	0,82	0,81	0,39	0,11
15	0,94	0,36	0,73	0,94	0,82	0,98	0,04
20	0,88	0,50	0,87	0,86	0,84	0,91	0,73
25	0,90	0,80	0,79	0,64	0,85	0,80	0,89

Nas figuras A4 e A5 apresentam-se as dispersões das figuras A2 e A3, respectivamente, em função dos valores de  $R^2$  expostos nos quadros A2 e A3.

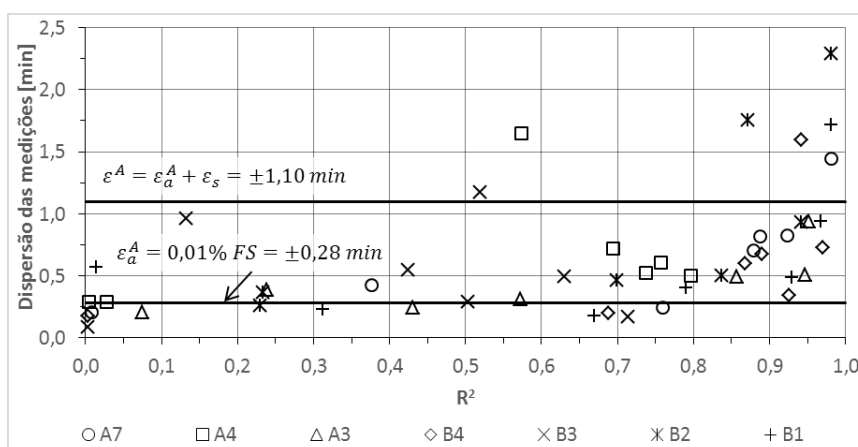


Figura A4 – Dispersão das medições inclinométricas da direção  $A$  em função dos valores respectivos de  $R^2$ .

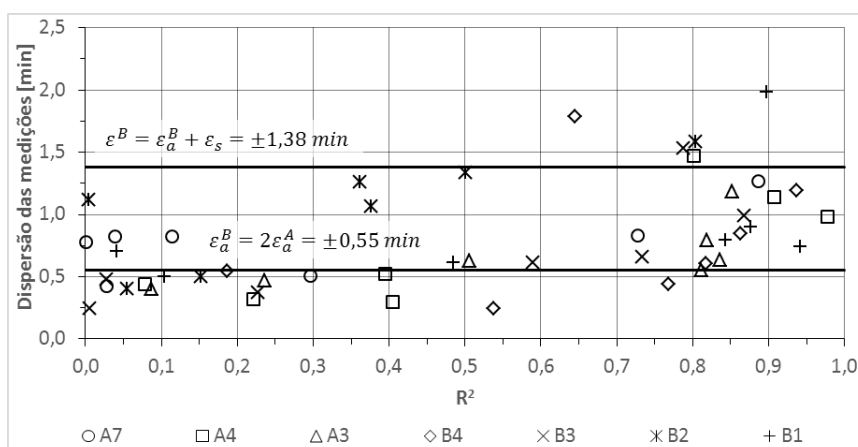


Figura A5 – Dispersão das medições inclinométricas da direção  $B$  em função dos valores respectivos de  $R^2$ .

Embora estas figuras demonstrem uma aglomeração de dispersões superiores a  $\varepsilon_a$  para valores de  $R^2 \geq 0,8$ , é difícil determinar uma relação direta entre as duas variáveis. Assim, conclui-se que

o aumento da dispersão das medições inclinométricas não se deve exclusivamente à deriva instrumental, embora este possa ser um fator que afete os resultados obtidos.

### Comparação entre medições obtidas com instrumentos distintos

Nas figuras A6 e A7 apresentam-se, para as direções *A* e *B*, respetivamente, os valores médios das diferenças entre as inclinações obtidas com os inclinómetros e com o clinómetro. Na mesma figura incluem-se as margens de erro calculadas com base no desvio padrão majorado pelo valor crítico da distribuição bicaudal *t-Student* com 7 graus de liberdade.

Considerando as margens de erro apresentadas, verifica-se que as diferenças entre medições inclinométricas só têm significado para inclinações superiores a 5°. No entanto, a comparação direta destes resultados pode ser falaciosa. Pois, existem diversas variáveis não controladas que podem afetar as medições de forma desigual, designadamente:

- a orientação das calhas de rotação pode não coincidir com a orientação do clinómetro;
- o alinhamento axial dos sensores acelerométricos é diferente em cada inclinómetro; este fator releva-se com o aumento da inclinação imposta;
- nada garante a manutenção da inclinação do tubo na direção transversal; este fator agrava a influência do alinhamento axial dos acelerómetros.

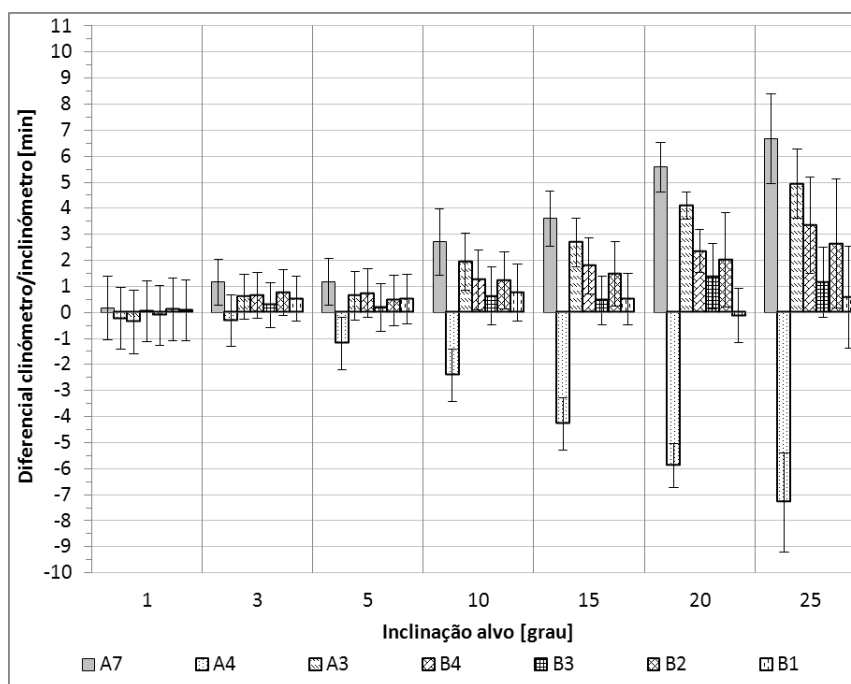


Figura A6 – Diferencial entre medições clinométricas e inclinométricas na direção *A*.

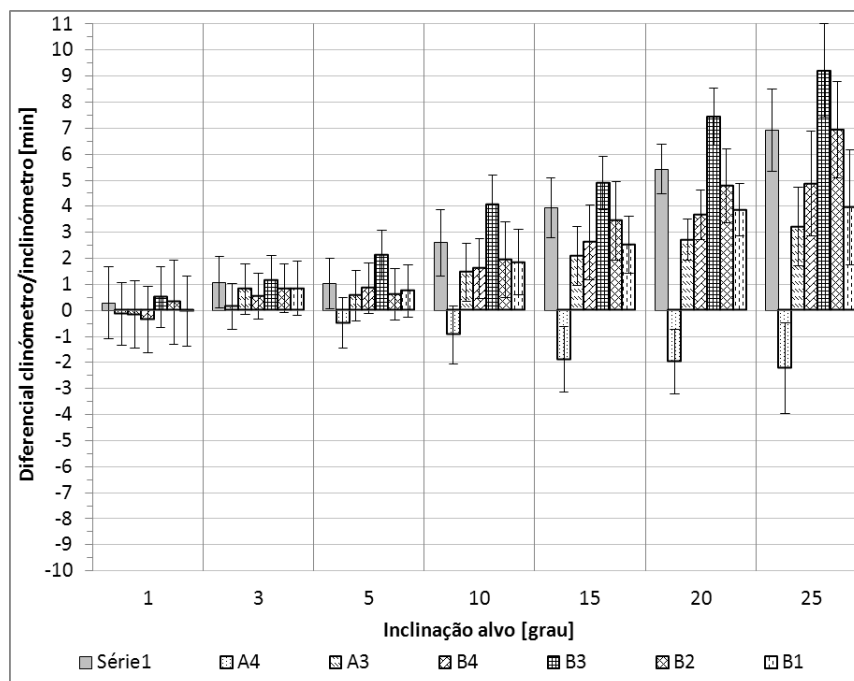


Figura A7 – Diferencial entre medições clinométricas e inclinométricas na direção *B*.

A comparação direta entre medições inclinométricas exige a correção da rotação axial dos acelerómetros (6.4.3). Visto que a variação da inclinação do tubo na direção transversal não é controlada, convém selecionar um inclinómetro de referência e corrigir os dados dos restantes inclinómetros relativamente ao ângulo de rotação do primeiro. Desta forma, apenas a diferença entre os ângulos de rotação é corrigida. Neste sentido, selecionou-se o inclinómetro B1 como referência.

Nos quadros A4 a A10 apresentam-se os dados de inclinação *Principal* e *Transversal* nas direções *A* e *B* de cada inclinómetro. Nos mesmos quadros apresenta-se:

- $R^2$ : quadrado do coeficiente de correlação das inclinações *Transversais* de um determinado acelerómetro em função dos valores homólogos *Principais* do outro acelerómetro<sup>1</sup>;
- $m$ : declive da função linear de correlação a que corresponde o valor  $R^2$ ;
- $\alpha$ : ângulo de rotação estimado de acordo com  $\alpha = \tan^{-1} m$ ;
- $\Delta\alpha$ : diferencial entre os ângulos de rotação do instrumento de referência e dos restantes.

Nas figuras A8 e A9 apresentam-se, nas direções *A* e *B*, respetivamente, as diferenças entre medições inclinométricas relativamente ao instrumento B1. Nestas figuras apresenta-se a sobreposição de colunas preenchidas com colunas sem preenchimento e contornadas a vermelho. As últimas representam as diferenças entre medições não corrigidas e as primeiras exprimem o diferencial entre medições corrigidas em função dos ângulos  $\Delta\alpha$  expostos nos quadros A5 a A10, de tal forma que  $d_c^P = d^P - d^T \tan \Delta\alpha$ , onde  $d_c^P$  é a medição *Principal* corrigida,  $d^P$  é a medição homóloga não corrigida e  $d^T$  é a medição *Transversal* correspondente (in ex.:  $d_c^{A,P} = d^{A,P} -$

<sup>1</sup> Por exemplo,  $B - Transversal$  em função de  $A - Principal$  e  $A - Transversal$  em função de  $B - Principal$ .

$$d^{B,T} \tan \Delta a; d_c^{B,P} = d^{B,P} - d^{A,T} \tan \Delta a).$$

Nas figuras A8 e A9 apresentam-se ainda barras de erro que correspondem à variabilidade associada à diferença entre medições não corrigidas (in ex.: a vermelho). Estes valores foram estimados com base nas dispersões expostas nas figuras A2 e A3, de acordo com  $s = \sqrt{(s_{B1})^2 + (s_{xz})^2}$ , onde  $s_{B1}$  é a dispersão das medições de B1 e  $s_{xz}$  é a dispersão respetiva do instrumento sob comparação.

O erro afeto às medições corrigidas não foi estimado, visto que:

- uma estimativa correta requer alguma complexidade;
- obtiveram-se dispersões muito assinaláveis em algumas medições transversais;
- os resultados obtidos com e sem correção não divergem significativamente.

Quadro A4 – Inclinações obtidas com o inclinómetro B1 e respetivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	56,01	6,53	55,90	-5,87
3	172,99	2,43	173,32	-1,93
5	308,11	-1,74	308,33	2,72
10	606,94	-10,71	608,02	11,16
15	903,58	-18,80	905,59	18,60
20	1199,98	-27,07	1203,96	26,55
25	1492,23	-34,95	1495,61	34,44
R <sup>2</sup> :	1,00		1,00	
m:	-0,03		0,03	
a [grau]:	-1,64		1,59	

Quadro A5 – Inclinações obtidas com o inclinómetro B2 e respetivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	56,03	6,57	56,24	-6,85
3	173,25	2,97	173,32	-3,20
5	308,05	-0,54	308,20	0,09
10	607,39	-7,58	608,12	6,90
15	904,56	-12,81	906,52	12,19
20	1202,13	-20,58	1204,89	18,90
25	1494,29	-28,03	1498,59	25,49
R <sup>2</sup> :	1,00		1,00	
m:	-0,02		0,02	
a [grau]:	-1,33		1,25	
Δa [grau]:	0,31		-0,33	

Quadro A6 – Inclinações obtidas com o inclinómetro B3 e respetivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	55,81	8,37	56,43	-7,23
3	172,77	8,43	173,62	-5,74
5	307,77	8,68	309,70	-2,76
10	606,81	9,65	610,23	1,78
15	903,55	13,71	907,97	3,88
20	1201,48	13,38	1207,54	9,51
25	1492,80	15,87	1500,87	12,81
R <sup>2</sup> :	0,93		0,99	
m:	0,01		0,01	
a [grau]:	0,31		0,79	
Δa [grau]:	1,95		-0,79	



Quadro A7 – Inclinações obtidas com o inclinômetro B4 e respectivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	55,97	7,02	55,57	-7,00
3	173,13	4,30	173,03	-4,50
5	308,31	1,68	308,44	-1,84
10	607,43	-3,69	607,79	2,96
15	904,87	-9,38	905,70	6,94
20	1202,45	-14,71	1203,78	11,42
25	1494,98	-18,15	1496,52	15,13
R <sup>2</sup> :	1,00		1,00	
m:	-0,02		0,02	
a [grau]:	-1,02		0,87	
Δa [grau]:	0,62		-0,71	

Quadro A8 – Inclinações obtidas com o inclinômetro A3 e respectivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	55,56	10,40	55,76	-7,13
3	173,08	14,58	173,30	-5,11
5	308,23	20,00	308,15	-3,47
10	608,11	31,54	607,64	0,27
15	905,77	44,77	905,17	1,71
20	1204,21	55,35	1202,82	5,30
25	1496,58	66,73	1494,87	9,29
R <sup>2</sup> :	1,00		0,99	
m:	0,04		0,01	
a [grau]:	2,26		0,61	
Δa [grau]:	3,90		-0,97	

Quadro A9 – Inclinações obtidas com o inclinômetro A4 e respectivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	55,69	6,61	55,78	-6,72
3	172,16	3,33	172,63	-3,66
5	306,40	0,46	307,11	-0,88
10	603,76	-6,38	605,23	5,71
15	898,80	-11,89	901,20	10,68
20	1194,22	-18,35	1198,12	16,23
25	1484,35	-23,87	1489,44	21,52
R <sup>2</sup> :	1,00		1,00	
m:	-0,02		0,02	
a [grau]:	-1,21		1,12	
Δa [grau]:	0,43		-0,47	

Quadro A10 – Inclinações obtidas com o inclinômetro A7 e respectivos parâmetros de rotação axial.

Inclinação alvo [grau]	Direção A [min]		Direção B [min]	
	Principal	Transversal	Principal	Transversal
1	56,08	7,08	56,21	-6,53
3	173,64	3,70	173,56	-3,22
5	308,76	1,16	308,62	-0,49
10	608,88	-4,57	608,78	5,99
15	906,69	-8,42	907,02	10,52
20	1205,68	-14,84	1205,53	15,75
25	1498,31	-20,56	1498,57	21,79
R <sup>2</sup> :	1,00		1,00	
m:	-0,02		0,02	
a [grau]:	-1,06		1,09	
Δa [grau]:	0,58		-0,50	

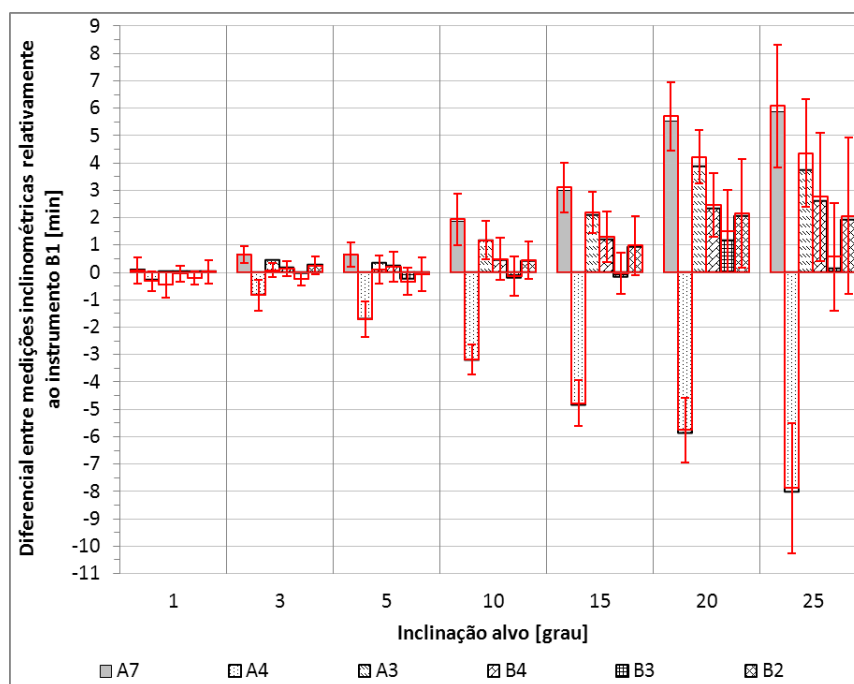


Figura A8 – Diferencial entre medições inclinométricas na direção A.

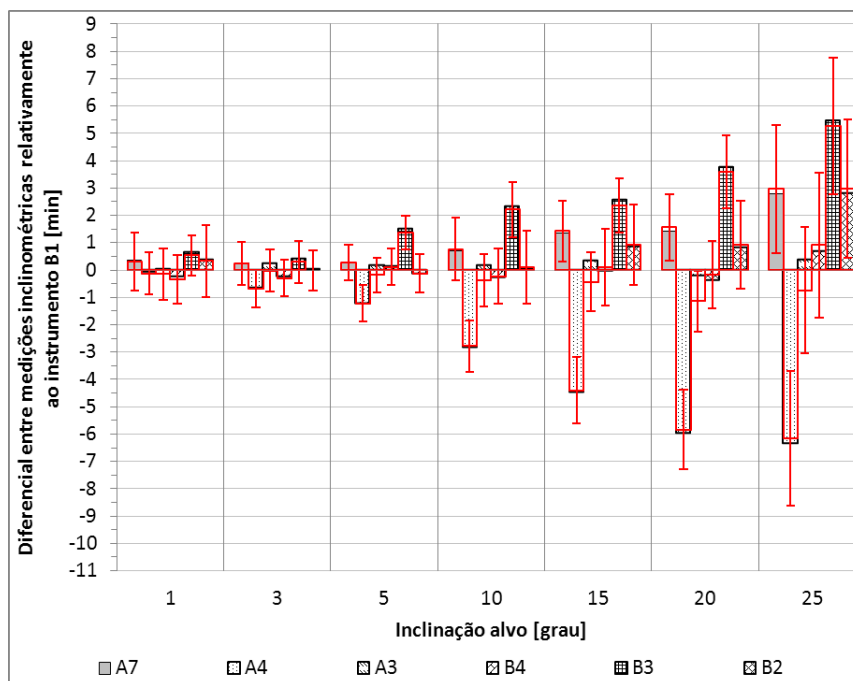


Figura A9 – Diferencial entre medições inclinométricas na direção *B*.

Nas figuras A8 e A9 observa-se:

- Na grande maioria das situações há um decréscimo dos diferenciais entre medições corrigidas relativamente aos valores homólogos entre medições não corrigidas. No entanto, o decréscimo verificado não tem qualquer significado quando se considera a variabilidade estimada a partir de medições não corrigidas<sup>1</sup>. Esta constatação é expectável, uma vez que a magnitude das medições *Principais* é muito superior à das medições *Transversais*, o que reduz a influência das últimas sobre as primeiras.
- Com exceção dos inclinómetros A4, A7 e B3, pode considerar-se que as medições inclinométricas são genericamente semelhantes até à inclinação alvo 5°.
- O inclinómetro A4 deriva no sentido contrário e apresenta um desfaseamento muito superior aos restantes instrumentos. Importa salientar que foram detetados problemas com este instrumento aproximadamente 1 a 2 anos após a execução destes ensaios<sup>2</sup>.
- O inclinómetro A7 diverge de B1 a partir de 5° na direção *A*.
- O inclinómetro B3 diverge de B1 a partir de 5° na direção *B*.

### Desvio na origem

Nas figuras A10 e A11 apresentam-se as dispersões associadas aos valores médios dos desvios obtidos com cada instrumento nas direções *A* e *B*, respetivamente. Os valores de dispersão correspondem ao desvio padrão majorado pelo valor crítico da distribuição bicaudal *t-Student* com 7 graus de liberdade.

<sup>1</sup> Note-se a não significância das correções de rotação nestes ensaios não se aplica a medições executadas em obra, uma vez que nesse caso os erros são integrados devido ao processo de cálculo.

<sup>2</sup> Após alguns resultados duvidosos, detetou-se que este instrumento apresentava sensibilidade à presença de água. Meses após esta constatação, um dos acelerómetros deixou de funcionar.

Nas mesmas figuras encontram-se demarcados os valores máximos do erro esperado ( $\varepsilon = \varepsilon_a + \varepsilon_s$ ) e da componente aleatória respetiva ( $\varepsilon_a$ ). A componente aleatória utilizada baseia-se nas especificações do sensor (in ex.: 0,01% FS; FS = 53°; Anexo II), uma vez que o troço de tubo é retilíneo e o sistema de fixação utilizado não é do tipo *roldana + mordentes*.

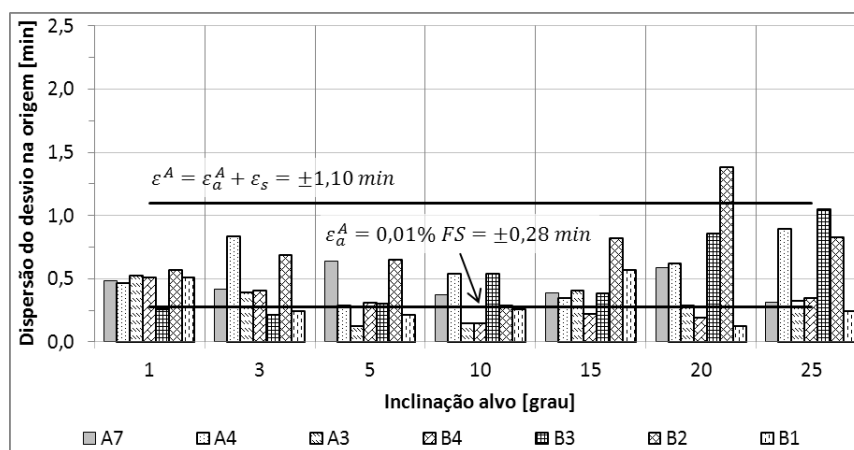


Figura A10 – Dispersão dos desvios na origem da direção *A* ao longo dos ensaios laboratoriais.

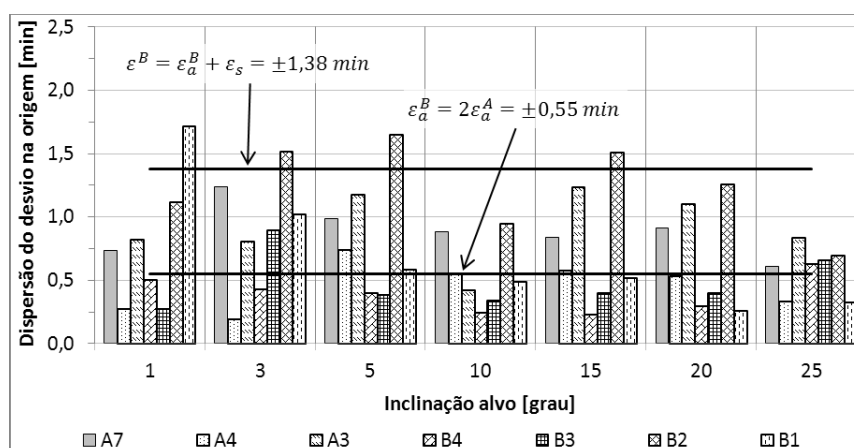


Figura A11 – Dispersão dos desvios na origem da direção *B* ao longo dos ensaios laboratoriais.

Das dispersões obtidas pode concluir-se o seguinte:

- Ao contrário das dispersões associadas às medições (figuras A2 e A3), as dispersões dos desvios na origem não apresentam tendência relativamente à variação da inclinação.
- De um modo geral, as dispersões da direção *B* são superiores às da direção *A*.
- Tal como se verificou na análise das dispersões das medições (figuras A2 e A3), os valores máximos de  $\varepsilon_a$  são insuficientes para a variabilidade verificada. Mantém-se a suspeita sobre a insuficiência do aparato para o nível de precisão pretendido, ou da inaptidão da repetibilidade do sensor para a definição daqueles limites.

Nos quadros A11 e A12 apresentam-se os valores de  $R^2$  das funções de correlação linear dos valores de desvio de cada ensaio em função dos índices respetivos, pela mesma ordem de execução.

Quadro A11 – Quadrado dos coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) entre as dispersões dos desvios na origem da direção *A* e os índices dos mesmos.

Inclin. alvo	Instrumento						
	B1	B2	B3	B4	A3	A4	A7
1	0,71	0,01	0,46	0,26	0,46	0,30	0,63
3	0,33	0,14	0,20	0,46	0,37	0,29	0,47
5	0,45	0,40	0,03	0,72	0,01	0,01	0,65
10	0,11	0,22	0,00	0,25	0,35	0,57	0,73
15	0,62	0,73	0,22	0,85	0,12	0,04	0,07
20	0,60	0,40	0,03	0,04	0,39	0,10	0,74
25	0,36	0,60	0,08	0,58	0,23	0,01	0,12

Quadro A12 – Quadrado dos coeficientes de correlação linear ( $R^2$ ) entre as dispersões dos desvios na origem da direção *B* e os índices dos mesmos.

Inclin. alvo	Instrumento						
	B1	B2	B3	B4	A3	A4	A7
1	0,48	0,18	0,24	0,17	0,18	0,10	0,00
3	0,67	0,94	0,36	0,56	0,39	0,02	0,00
5	0,65	0,50	0,82	0,00	0,36	0,48	0,46
10	0,46	0,67	0,36	0,86	0,33	0,00	0,12
15	0,31	0,58	0,19	0,00	0,80	0,76	0,01
20	0,12	0,05	0,28	0,09	0,80	0,57	0,18
25	0,00	0,37	0,64	0,31	0,82	0,40	0,07

Ao contrário do que se observa nas medições (quadros A2 e A3), não se verifica a persistência de valores elevados de  $R^2$  associados aos desvios na origem. Esta observação leva a concluir que a deriva instrumental aconteceu em ambos os sentidos de leitura (in ex.: 0° e 180°). Uma deriva instrumental em ambos os sentidos, numa inclinação estática, obriga a questionar a eficiência do controlo sobre os níveis de carga das baterias das unidades de aquisição. De facto, não houve um controlo rigoroso desta variável. No entanto, esta hipótese parece pouco provável mediante uma análise dos valores expostos nos quadros A2 e A3 em função dos horários de execução das medições. Pois, todos os instrumentos foram ensaios sequencialmente, mas não se encontrou qualquer relação entre as sequências de ensaio e a persistência de valores elevados de  $R^2$ .

Nas figuras A12 e A13 apresentam-se os valores médios do desvio na origem em cada inclinação alvo, nas direções *A* e *B*, respetivamente. Nestas figuras incluem-se também as barras de erro das dispersões expostas nas figuras A10 e A11, e os valores limite recomendados pelo fabricante.

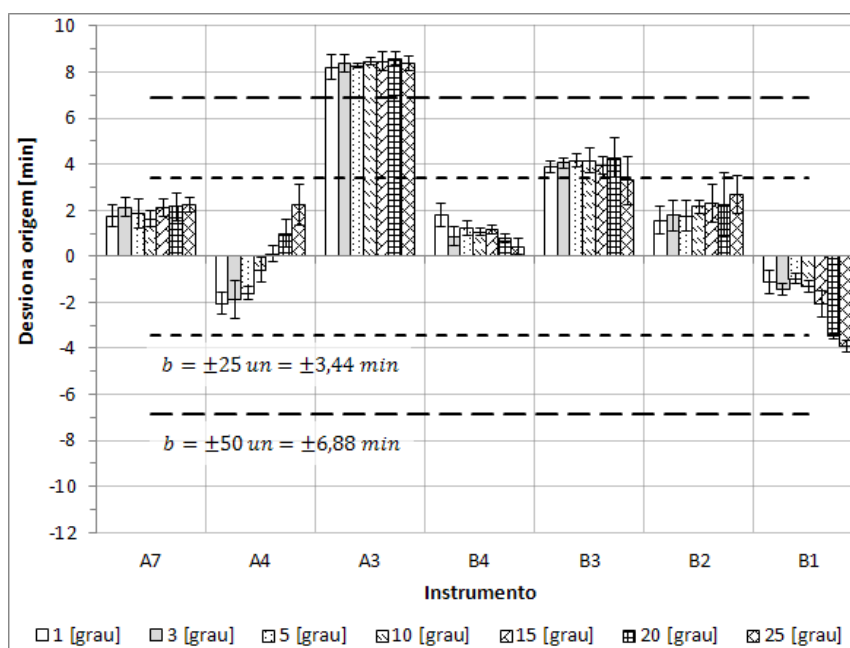


Figura A12 – Desvios na origem da direção *A* de cada instrumento em cada inclinação alvo.

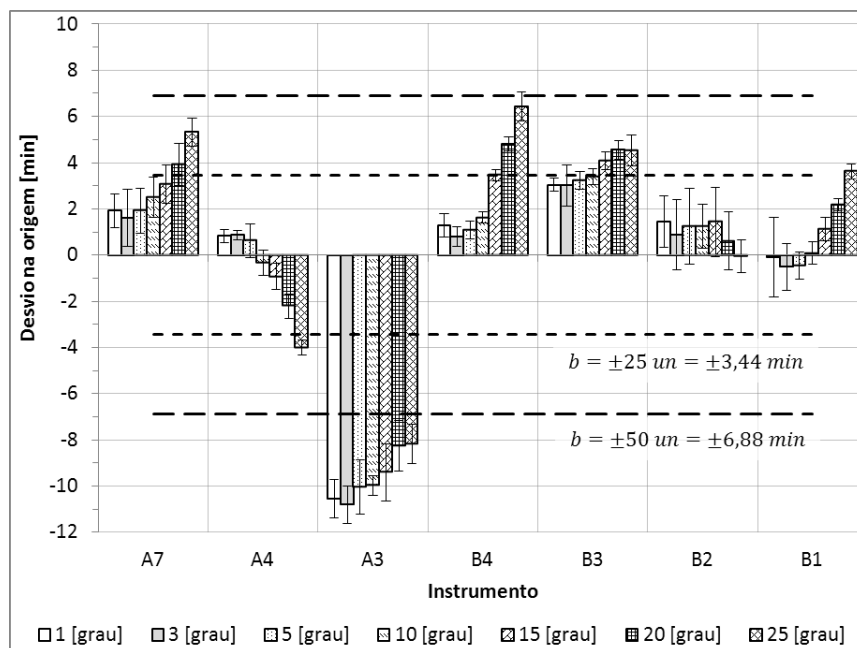


Figura A13 – Desvios na origem da direção *B* de cada instrumento em cada inclinação alvo.

Embora não se tenha verificado deriva do desvio na origem em cada ensaio (quadros A11 e A12), nas figuras A12 e A13 observa-se que a maioria dos instrumentos apresenta deriva do desvio na origem em função da inclinação alvo. Esta constatação é mais evidente na direção *B*, onde vários instrumentos com desvio aceitável em inclinações pequenas acabam por apresentar valores além dos limites máximos recomendados em inclinações acentuadas.

Importa ainda salientar que a deriva é mais evidente a partir da inclinação alvo 5°, independentemente do instrumento ou da direção a considerar. Esta afirmação é reforçada pelo quadro A13, onde se apresentam os coeficientes  $R^2$  e os declives ( $m$ ) das funções de correlação linear entre os valores médios de desvio na origem em cada direção e as inclinações alvo. Estes resultados apresentam-se divididos nos grupos 1 – 25°, 1 – 5° e 5 – 25°, a fim de evidenciar o agravamento que se verifica na deriva do desvio a partir da inclinação alvo 5°.

Quadro A13 – Coeficientes  $R^2$  e declives ( $m$ , *min/grau*) das funções de correlação linear entre os desvios na origem de cada direção ( $A$  ou  $B$ ) e as inclinações alvo ensaiadas. Comparação entre os coeficientes correspondentes aos grupos de inclinações  $1 - 25^\circ$ ,  $1 - 5^\circ$  e  $5 - 25^\circ$ .

Instr.	Inclin. alvo	Direção A		Direção B	
		$R^2$	$m$	$R^2$	$m$
B1	[1-25]	0,87	-0,12	0,91	0,16
	[1-5]	0,14	0,05	0,64	-0,09
	[5-25]	0,96	-0,16	0,98	0,21
B2	[1-25]	0,92	0,04	0,55	-0,04
	[1-5]	0,72	0,05	0,13	-0,05
	[5-25]	0,86	0,04	0,69	-0,06
B3	[1-25]	0,19	-0,02	0,94	0,07
	[1-5]	0,98	0,07	0,65	0,05
	[5-25]	0,42	-0,03	0,91	0,08
B4	[1-25]	0,58	-0,04	0,94	0,23
	[1-5]	0,39	-0,15	0,18	-0,05
	[5-25]	0,80	-0,04	0,98	0,28
A3	[1-25]	0,34	0,01	0,93	0,11
	[1-5]	0,16	0,02	0,42	0,12
	[5-25]	0,13	0,01	0,90	0,11
A4	[1-25]	0,99	0,18	0,95	-0,20
	[1-5]	0,99	0,11	0,63	-0,05
	[5-25]	0,99	0,19	0,96	-0,22
A7	[1-25]	0,38	0,02	0,93	0,14
	[1-5]	0,10	0,03	0,00	0,00
	[5-25]	0,66	0,03	0,96	0,17

#### Influência do desvio na origem nas medições inclinométricas

A evidência mais direta da influência do valor do desvio na origem nas medições inclinométricas seria a obtenção de diferenciais de medição mais acentuados em pares de instrumentos com maiores discrepâncias nos valores de desvio. No entanto, a comparação das figuras A12 e A13 com as figuras A8 e A9, respetivamente, nega esta hipótese, uma vez que os instrumentos com valores de desvio mais acentuados não são necessariamente os que apresentam diferenciais superiores.

Tendo-se verificado derivas de desvio na maior parte dos instrumentos (figuras A12 e A13; quadro A13), convém avaliar a influência que desse fenómeno nas medições inclinométricas. Com esta finalidade, definiram-se como padrões de comparação os instrumentos que apresentam menores valores de  $R^2$  e de  $m$  nas direções  $A$  e  $B$  (quadro A13). Assim, os instrumentos A3 e B2 constituem os padrões de comparação nas direções  $A$  e  $B$ , respetivamente.

Calculou-se o diferencial entre as medições de cada inclinómetro e do instrumento padrão da direção respetiva. O mesmo procedimento foi aplicado aos valores de desvio na origem. Seguidamente foram estabelecidas funções de correlação linear entre os diferenciais das medições e os diferenciais de desvio. Valores de  $R^2$  elevados estabelecem a forte possibilidade das diferenças entre medições dependerem da deriva ocorrida no desvio na origem. A mesma sequência de procedimentos foi aplicada às leituras de cada sentido (in ex.: A0, A180, B0 e B180).

Nos quadros A14 e A15 apresenta-se um resumo dos valores obtidos de  $R^2$  e de  $m$ , respectivamente.

Quadro A14 – Coeficientes  $R^2$  das funções de correlação linear entre os diferenciais das medições/leituras e dos desvios na origem de instrumentos distintos. Valores obtidos nas direções  $A$  e  $B$  correspondentes aos grupos de inclinações 1 – 25°, 1 – 5° e 5 – 25°.

Instr.	Inclin. alvo	Direção A			Direção B		
		$(A0-A180)/2$	$A0$	$A180$	$(B0-B180)/2$	$B0$	$B180$
B1	[1-25]	0,95	0,98	0,23	0,89	0,93	0,99
	[1-5]	0,08	0,59	0,34	0,08	0,12	0,48
	[5-25]	0,99	1,00	0,03	0,90	0,92	0,99
B2	[1-25]	0,71	0,58	0,81	-	-	-
	[1-5]	0,93	0,90	0,95	-	-	-
	[5-25]	0,53	0,34	0,71	-	-	-
B3	[1-25]	0,56	0,68	0,33	0,54	0,91	0,45
	[1-5]	0,47	0,20	0,66	0,12	0,38	0,00
	[5-25]	0,75	0,84	0,49	0,49	0,96	0,87
B4	[1-25]	0,68	0,83	0,01	0,85	0,98	0,99
	[1-5]	0,90	0,99	0,98	0,00	0,01	0,02
	[5-25]	0,89	0,97	0,03	0,95	0,99	1,00
A3	[1-25]	-	-	-	0,88	0,03	0,97
	[1-5]	-	-	-	0,61	0,91	0,41
	[5-25]	-	-	-	0,90	0,11	0,98
A4	[1-25]	0,97	0,95	0,98	0,97	0,99	0,92
	[1-5]	0,73	0,62	0,80	0,02	0,60	0,46
	[5-25]	0,97	0,93	0,98	0,99	1,00	0,97
A7	[1-25]	0,15	0,63	0,01	0,03	0,98	0,98
	[1-5]	1,00	0,99	0,98	0,74	0,88	0,24
	[5-25]	0,36	0,76	0,11	0,48	0,99	0,99

Quadro A15 – Declives  $m$  (min/min) das funções de correlação linear entre os diferenciais das medições/leituras e dos desvios na origem de instrumentos distintos. Valores obtidos nas direções  $A$  e  $B$  correspondentes aos grupos de inclinações 1 – 25°, 1 – 5° e 5 – 25°.

Instr.	Inclin. alvo	Direção A			Direção B		
		$(A0-A180)/2$	$A0$	$A180$	$(B0-B180)/2$	$B0$	$B180$
B1	[1-25]	1,56	2,93	0,19	-0,50	0,56	-1,57
	[1-5]	0,30	1,27	-0,68	-0,46	0,56	-1,47
	[5-25]	1,39	2,75	0,03	-0,53	0,55	-1,60
B2	[1-25]	-2,81	-2,44	-3,19	-	-	-
	[1-5]	-4,98	-4,19	-5,78	-	-	-
	[5-25]	-2,09	-1,71	-2,49	-	-	-
B3	[1-25]	3,62	5,17	2,08	0,63	1,78	-0,53
	[1-5]	-2,02	-1,09	-2,96	0,92	1,93	-0,09
	[5-25]	3,06	4,57	1,57	0,31	1,48	-0,85
B4	[1-25]	1,39	2,85	-0,06	-0,26	0,83	-1,35
	[1-5]	0,34	1,35	-0,67	-0,20	0,80	-1,20
	[5-25]	1,95	3,78	0,13	-0,31	0,79	-1,40
A3	[1-25]	-	-	-	-0,85	-0,06	-1,64
	[1-5]	-	-	-	0,57	1,51	-0,37
	[5-25]	-	-	-	-0,93	-0,13	-1,73
A4	[1-25]	-3,02	-2,18	-3,86	2,38	3,47	1,28
	[1-5]	-4,08	-3,18	-4,99	0,15	1,15	-0,85
	[5-25]	-2,84	-2,01	-3,68	2,51	3,63	1,39
A7	[1-25]	0,83	1,36	0,30	-0,03	1,08	-1,14
	[1-5]	0,16	1,15	-0,84	1,52	2,53	0,51
	[5-25]	1,15	1,51	0,79	-0,10	1,02	-1,22

Nestes quadros é possível observar o seguinte:

- Quando consideradas as medições (in ex.:  $(0^\circ - 180^\circ)/2$ ), diversos instrumentos que apresentam deriva considerável do desvio em função da inclinação imposta (quadro A13) também apresentam boa correlação relativamente aos instrumentos padrão selecionados (quadros A14 e A15). Bons exemplos desta observação são os inclinómetros B1, B4 (direção B), A3 (direção B) e A4 (direções A e B).
- Há situações que contradizem a afirmação anterior. No entanto, algumas destas discrepâncias podem ter explicação mediante a análise dos parâmetros obtidos em  $0^\circ$  e em  $180^\circ$  (quadros A14 e A15). Por exemplo:
  - o B2 (direção A): o quadro A12 apresenta correlação significativa para  $1 - 25^\circ$  e  $5 - 25^\circ$ . Embora o quadro A14 demonstre correlação significativa das medições apenas em  $1 - 5^\circ$ , as leituras A180 têm valores significativos em  $1 - 25^\circ$  e  $5 - 25^\circ$ .
  - o B3 (direção B): os valores do quadro A12 são perfeitamente explicados pelos valores do quadro A14 no sentido A0.
- Outras ocorrências resultam em correlações aparentemente significativas no quadro A14, mas com declives insignificantes ou com derivas em sentidos contrários em  $0^\circ$  e  $180^\circ$ . Note-se que a ocorrência de derivas em sentidos contrários é um sinal positivo; pois significa a redução (ou anulação) da deriva do desvio na origem e consequentemente de alterações da sensibilidade que poderão daí resultar. Por exemplo:
  - o B4 e A7 (direção A,  $1 - 5^\circ$ ): a disparidade entre os valores de correlação dos quadros A12 e A14 pode explicar-se pelos declives correspondentes do quadro A15.
- Verificam-se também situações onde é difícil associar a deriva do desvio às diferenças entre medições, como é o caso dos instrumentos B3 (direção A) e A7 (direção B).

## Conclusões

Deste estudo é possível concluir:

- A variabilidade das medições inclinométricas aumenta em função do aumento da inclinação imposta, particularmente a partir de inclinações superiores a  $5^\circ$ . Este facto está diretamente relacionado com o erro de medição e reforça a importância da verticalidade das instalações inclinométricas a fim de se obterem resultados de boa qualidade.
- O aumento da variabilidade das medições em função do aumento da inclinação imposta poderá estar relacionado com fenómeno de deriva das medições (figuras A4 e A5).
- Os valores do erro do sensor podem não ser adequados para a definição de limites de confiança destinados ao controlo da qualidade dos dados inclinométricos. Observando-se as figuras A2 e A3, é possível que os valores publicados expressem um desvio padrão (in ex.: coeficiente de cobertura de 68% da distribuição normal) e que requeiram expansão.
- A diferença de sensibilidade entre instrumentos é exacerbada em função do aumento da inclinação imposta (figuras A6, A7, A8 e A9). Se for considerada a variabilidade obtida, estas diferenças ganham maior relevância em inclinações superiores a  $5^\circ$ .
- A avaria detetada no instrumento A4 1 a 2 anos após a execução destes ensaios leva a colocar a hipótese de deteção precoce do mau funcionamento de inclinómetros através de ensaios de verificação deste tipo.



- Valores elevados de desvio na origem (in ex.: A3 e B3) não parecem estar associados a alterações significativas dos valores de medição. No entanto, a deriva do desvio na origem pode estar associada a alterações de sensibilidade. Embora esta afirmação permaneça inconclusiva<sup>1</sup>, a sua validação poderá significar a ocorrência de deslocamentos devidos a alterações do desvio na origem, particularmente em instalações com períodos de observação muito longos cujos instrumentos utilizados tenham manutenção desadequada.

Importa notar que estas conclusões estão necessariamente dependentes de vários fatores que podem e devem ser questionados. Por exemplo:

- o aparato utilizado oferece condições insuficientes para o tipo de estudo pretendido;
- não houve um controlo rigoroso dos níveis de carga das unidades de aquisição;
- o método de ensaio foi o possível, mas pode não ter sido o mais adequado<sup>2</sup>;
- as incertezas relacionadas com a falta de controlo das inclinações *Transversais* e com o alinhamento do tubo inclinométrico carecem dum estudo geométrico específico;
- só foram ensaiados instrumentos analógicos;
- o tipo de análise aplicada (in ex.: técnicas estatísticas) pode não ser a mais adequada;
- a quantidade de dados é insuficientes para o tipo de análise executada.

Seria uma mais-valia dispor de um aparato/equipamento que garantisse a repetibilidade das inclinações impostas numa amplitude considerável (in ex.: até  $\pm 10 - 15^\circ$ ).

---

<sup>1</sup> Nada garante que a deriva do desvio na origem ao longo do tempo implique alterações de sensibilidade em inclinações próximas do plano de referência do instrumento.

<sup>2</sup> Por exemplo, a rotação constante de cada inclinómetro para obtenção de todas as leituras em cada inclinação pode ter produzido algum efeito histerético.

## ANEXO IV: DETERMINAÇÃO DA CONSTANTE INSTRUMENTAL DE SISTEMAS INCLINOMÉTRICOS ATRAVÉS DE ENSAIOS LABORATORIAIS COMPARATIVOS

### Introdução e enquadramento

Neste anexo descreve-se um caso de obra que envolve a determinação da constante instrumental dum inclinómetro com a finalidade de restituir a sensibilidade de origem. O sistema inclinométrico envolvido é um modelo analógico que já não está disponível no mercado.

Mediante a ocorrência de uma avaria na unidade de aquisição do sistema, requisitou-se a reparação da mesma ao Núcleo de Sistemas Eletrotécnicos e Mecânicos (NSEM) do Centro de Instrumentação Científica (CIC) do LNEC. A reparação requereu a substituição de alguns componentes, de entre os quais uma bateria interna.

A unidade retornou ao Núcleo de Geotecnia Urbana e de Transportes (NGUT) do Departamento de Geotecnia (DG) do LNEC pouco antes dum serviço agendado com aquele sistema. Antes da saída para o serviço fez-se uma verificação rápida dos níveis de carga da bateria e da obtenção de uma resposta à variação de inclinação da sonda.

Durante o serviço detetaram-se diversas dificuldades, de entre as quais:

- independentemente da instalação inclinométrica observada, os valores de leitura obtidos eram completamente diferentes dos registos da campanha anterior;
- a unidade de leitura não permitia obter resposta do sensor da direção *B*.

Após o retorno da equipa de trabalho procedeu-se a uma análise detalhada da informação obtida, através da qual se conseguiu diagnosticar um erro de sensibilidade e definir procedimentos de correção com sucesso (Anexo IX).

Posteriormente analisou-se a unidade de aquisição e detetou-se que o modo de leitura estava configurado para um sistema uniaxial. Assim, conclui-se que a substituição da bateria interna terá resultado na eliminação da configuração da unidade, incluindo os parâmetros de calibração. Mediante a impossibilidade em aceder à interface de configuração da unidade de aquisição<sup>1</sup>, o NSEM instalou um *switch* para permitir a comutação entre os acelerómetros das direções *A* e *B*.

Executaram-se ensaios laboratoriais e medições num inclinómetro do campus do LNEC (tubo-prova) para confirmar ou refutar a constante instrumental obtida a partir de dados de obra, uma vez que aquele método de correção (Anexo IX) nunca havia sido testado. Os ensaios confirmaram aquele método de correção e permitiram afinar o valor daquela constante instrumental.

---

<sup>1</sup> A interface não está exposta e a marca não forneceu apoio para o modelo em causa.

Mais tarde foram encontrados<sup>1</sup> os procedimentos de acesso à interface de configuração da unidade de aquisição, o que tornou possível a atualização dos parâmetros de calibração. Nas secções seguintes descrevem-se os procedimentos de calibração executados e os valores determinados.

### Aparato de medição e procedimentos de ensaio

O aparato utilizado para a execução dos ensaios laboratoriais corresponde à versão renovada do que apresenta no Anexo III. A madeira foi protegida do ingresso da humidade, foi acoplado um sistema de fixação e foram também instaladas duas bases de clinómetro para controlo da inclinação (figura A14). As operações de renovação foram inteiramente planeadas pelo Eng. Arlindo de Sousa e executadas pelos técnicos António Cruz e José Alvarez.

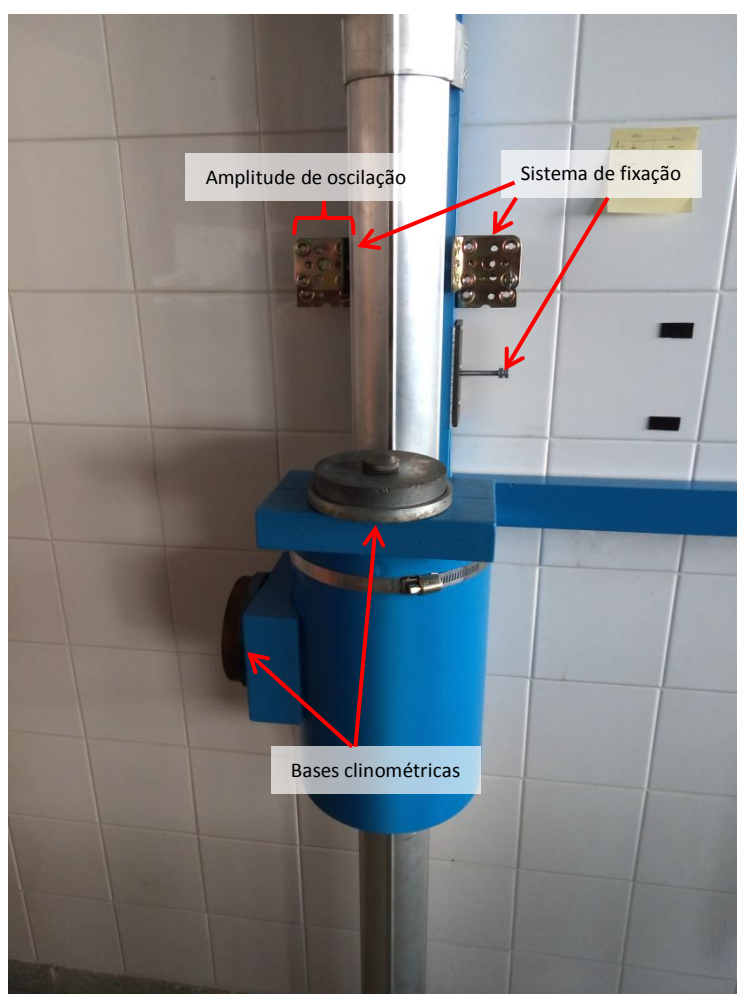


Figura A14 – Aparato de medição utilizado para efeitos de calibração.

Os procedimentos de execução dos ensaios foram planeados pelo Eng. Arlindo de Sousa e pelo Bolseiro Luís Coimbra, sendo semelhantes aos descritos no Anexo III com algumas diferenças:

<sup>1</sup> Os procedimentos de acesso ao interface de configuração da unidade de aquisição foram encontrados pelo Técnico Superior António Coelho num manual doutro equipamento da mesma marca.

- são recolhidas séries de 3 medições, em vez de 8;
- cada série de medições é executada de forma sequencial em todas as inclinações pretendidas, em vez de consistir em  $n$  repetições sequenciais em cada inclinação;
- as inclinações são arbitrárias e definem-se pela dimensão de 3 batentes;
- apenas se fez uso das medições da direção  $A$ , uma vez que não se dispunha de medições na direção  $B$  anteriores à avaria da unidade de aquisição<sup>1</sup>.

As medições clinométricas servem de controlo da inclinação imposta e são executadas sempre que se procede ao registo de medições inclinométricas.

Importa referir que os procedimentos de calibração que se descrevem nas secções seguintes só foram possíveis porque existem registos de ensaio com aquele sistema anteriores à avaria da unidade de aquisição. Ou seja, o padrão de calibração utilizado foram os registos dos ensaios anteriores. Este facto reforça a vantagem e a necessidade de implementar um calendário de execução de medições de verificação inclinométrica.

### Descrição dos procedimentos de calibração executados e apresentação dos resultados obtidos

No quadro A16 apresentam-se as medições registadas antes e depois da ocorrência de avaria. No quadro A17 apresenta-se um resumo estatístico destas medições.

Quadro A16 – Medições clinométricas e inclinométricas registadas antes e após a avaria da unidade de aquisição inclinométrica.

DATA	SÉRIE		BASE HORIZONTAL			BASE VERTICAL			INCLINÓMETRO			NOTA
	Nº	Rep.	1-3	3-1	[min]	1-3	3-1	[min]	A0	A180	[min]	
2018-07-04	A	1	-481	491	-66,83	-411	463	-60,09	-270	220	-16,84	Antes da ocorrência
		2	-481	491	-66,83	-413	463	-60,23	-240	240	-16,50	
		3	-480	490	-66,69	-413	462	-60,16	-240	230	-16,16	
2018-11-21		1	-468	501	-66,62	-400	470	-59,82	-247	23	-9,28	Após a ocorrência
		2	-467	498	-66,35	-397	466	-59,34	-245	23	-9,21	
		3	-466	498	-66,28	-397	466	-59,34	-247	22	-9,25	
2018-11-23		1	-471	495	-66,42	-405	465	-59,82	-244	23	-9,18	
		2	-471	495	-66,42	-402	466	-59,68	-	-	-	
2018-07-04	B	1	-742	752	-102,72	-675	722	-96,05	-760	760	-52,25	Antes da ocorrência
		2	-743	753	-102,86	-676	723	-96,19	-770	750	-52,25	
		3	-742	754	-102,86	-675	723	-96,12	-770	760	-52,60	
2018-11-21		1	-730	762	-102,58	-660	737	-96,05	-548	324	-29,98	Após a ocorrência
		2	-731	762	-102,65	-662	730	-95,71	-546	324	-29,91	
		3	-731	762	-102,65	-660	730	-95,57	-549	323	-29,98	
2018-11-23		1	-735	759	-102,72	-664	728	-95,71	-551	320	-29,94	
		2	-735	758	-102,65	-666	724	-95,57	-	-	-	
2018-07-04	C	1	-1009	1018	-139,37	-938	990	-132,56	-1310	1270	-88,69	Antes da ocorrência
		2	-1007	1017	-139,16	-939	990	-132,63	-1310	1270	-88,69	
		3	-1007	1016	-139,09	-940	990	-132,70	-1310	1270	-88,69	
2018-11-21		1	-997	1027	-139,16	-927	1000	-132,49	-852	630	-50,95	Após a ocorrência
		2	-996	1027	-139,09	-926	997	-132,22	-853	629	-50,95	
		3	-997	1029	-139,30	-927	996	-132,22	-855	628	-50,98	
2018-11-23		1	-1000	1023	-139,09	-928	987	-131,67	-855	625	-50,88	
		2	-999	1022	-138,95	-927	997	-132,28	-	-	-	

<sup>1</sup> Partiu-se do princípio que as constantes instrumentais dos acelerómetros  $A$  e  $B$  seriam iguais. Mais tarde constatou-se a aplicabilidade deste princípio.

Quadro A17 – Resumo estatístico das medições clinométricas e inclinométricas registadas antes e após a avaria da unidade de aquisição inclinométrica.

DATA	SÉRIE	BASE HORIZONTAL		BASE VERTICAL		INCLINÓMETRO		NOTA
		$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	
2018-07-04	A	-66,78	0,08	-60,16	0,07	-16,50	0,34	Antes
2018-11-21		-66,42	0,13	-59,60	0,25	-9,23	0,04	Após
2018-11-23								
2018-07-04	B	-102,81	0,08	-96,12	0,07	-52,37	0,20	Antes
2018-11-21		-102,65	0,05	-95,72	0,20	-29,95	0,03	Após
2018-11-23								
2018-07-04	C	-139,21	0,14	-132,63	0,07	-88,69	0,00	Antes
2018-11-21		-139,12	0,12	-132,17	0,31	-50,94	0,04	Após
2018-11-23								

Durante os ensaios verificou-se que houve uma alteração persistente das inclinações clinométricas medidas antes e depois da avaria. Estas alterações já haviam sido notadas em ensaios anteriores com outros instrumentos, sabendo-se que se deviam a uma alteração efetiva do alinhamento do aparato ou à introdução de batentes para definição das inclinações. Por esta razão, houve necessidade de corrigir as medições inclinométricas anteriores à avaria em função das alterações de inclinação clinométrica. Esta correção fez-se da seguinte forma:

1. determinação do declive das funções de correlação linear entre as medições clinométricas e inclinométricas, antes e depois da avaria;
2. correção das medições inclinométricas anteriores à avaria de acordo com a expressão

$$m_i^{corr} = m_i + d(m_c^{após} - m_c^{antes})$$

, onde  $m_i$  e  $m_c$  são os valores médios das medições inclinométricas e clinométricas, respetivamente, e  $d$  é o declive da função de correção linear.

Na figura A15 apresentam-se as funções de correlação linear obtidas e no quadro A18 apresenta-se o resumo estatístico do quadro A17 com os valores médios das medições inclinométricas anteriores à avaria corrigidos.

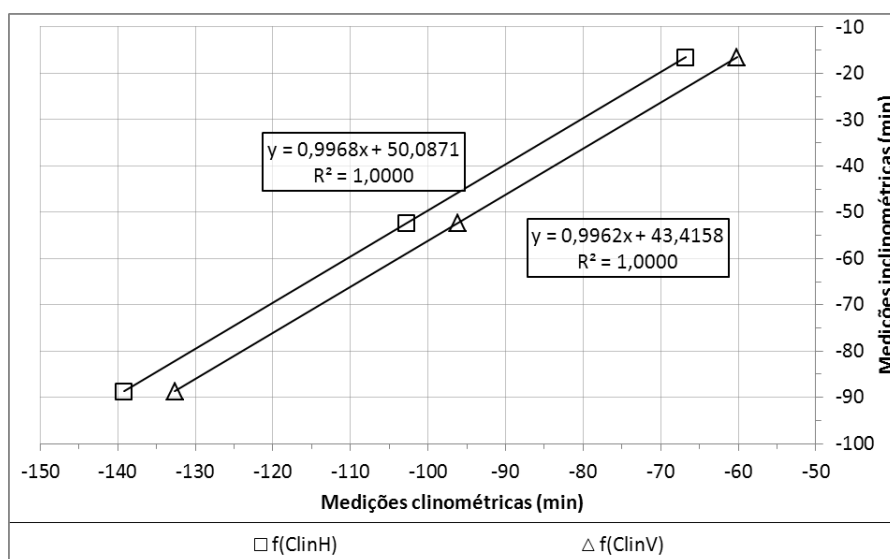


Figura A15 – Correlação entre medições clinométricas e inclinométricas.

Quadro A18 – Resumo estatístico das medições clinométricas e inclinométricas com correção das últimas em função da variação registada nas medições clinométricas antes e após a avaria da unidade de aquisição.

DATA	SÉRIE	BASE HORIZONTAL		BASE VERTICAL		INCLIN. - DIF.ClinH		INCLIN. - DIF.ClinV		NOTA
		$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	$\mu$ [min]	$\sigma$ [min]	
2018-07-04	A	-66,78	0,08	-60,16	0,07	<b>-16,14</b>	<b>0,38</b>	<b>-15,94</b>	<b>0,43</b>	Antes
2018-11-21		-66,42	0,13	-59,60	0,25	-9,23	0,04	-9,23	0,04	Após
2018-11-23										
2018-07-04	B	-102,81	0,08	-96,12	0,07	<b>-52,21</b>	<b>0,22</b>	<b>-51,97</b>	<b>0,29</b>	Antes
2018-11-21		-102,65	0,05	-95,72	0,20	-29,95	0,03	-29,95	0,03	Após
2018-11-23										
2018-07-04	C	-139,21	0,14	-132,63	0,07	<b>-88,61</b>	<b>0,19</b>	<b>-88,24</b>	<b>0,31</b>	Antes
2018-11-21		-139,12	0,12	-132,17	0,31	-50,94	0,04	-50,94	0,04	Após
2018-11-23										

Com base nos quadros A17 e A18 definiram-se funções de correlação linear entre as medições inclinométricas anteriores e posteriores à avaria (figura A16). A partir dos declives destas funções, sabendo-se que a constante instrumental do sistema inclinométrico é  $k = 50000$ , é possível definir a constante instrumental efetiva ( $k_{ef}$ ) através da expressão  $k_{ef} = km$ , onde  $m$  é o declive obtido a partir da figura A16.

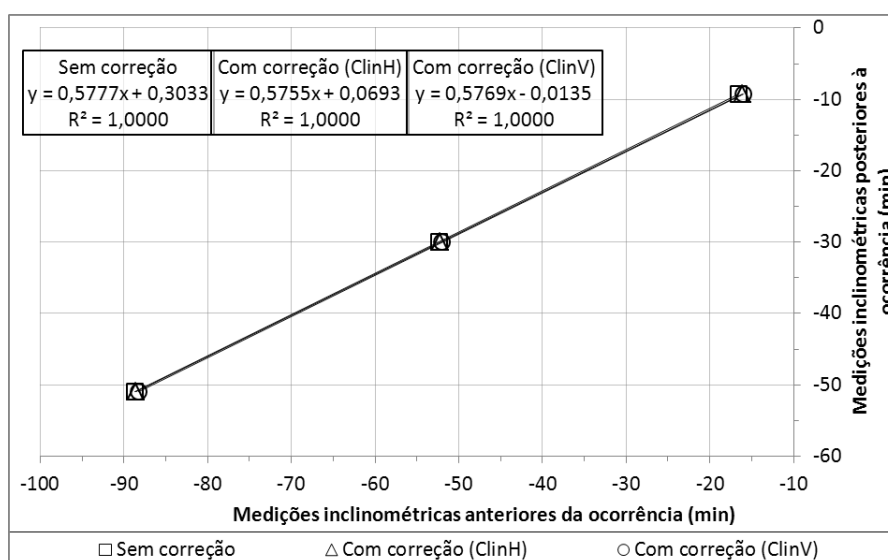


Figura A16 – Correlação entre as medições inclinométricas anteriores e posteriores à ocorrência.

No quadro A19 apresentam-se os valores de  $m$  e de  $k_{ef}$  obtidos sem correção (quadro A17), com correção (quadro A18) e a partir de dados de obra (Anexo IX). No quadro A19 apresentam-se também estimativas da variabilidade associada aos valores determinados. Estas estimativas produziram-se através da expressão

$$\varepsilon[\%] = 100 \sqrt{\frac{\sum(\sigma_i/\mu_i)^2}{n}}$$

, onde  $\sigma_i$  e  $\mu_i$  são a dispersão e a média das medições inclinométricas anteriores à avaria, sendo  $n = 3$  no caso dos ensaios laboratoriais. No caso dos dados de obra esta expressão não se aplica diretamente porque a constante determinada resulta de uma média ponderada de 4 tubos incli-

nométricos (Anexo IX). Contudo, pode considerar-se que  $\sigma_i$  e  $\mu_i$  representam os valores de dispersão e médio dos coeficientes de deriva (6.4.5) obtidos em cada instalação, sendo  $n = 4$ .

Quadro A19 – Constantes instrumentais determinadas a partir dos ensaios laboratoriais e de dados de obra.

Variante	Declive (m)	K=50000*m	Erro (%)	Erro (un)
Sem correção	0,5777	28885	1,2226	353
Com correção (ClinH)	0,5755	28775	1,3703	394
Com correção (ClinV)	0,5769	28845	1,5933	460
Dados de obra	0,5764	28820	4,8613	1401

Relativamente aos resultados expostos no quadro A19, é curioso constatar que:

- a média dos resultados corrigidos –  $(ClinH + ClinV)/2$  – resulta em  $k_{ef} = 28810$ , valor muito próximo da constante obtida a partir dos dados de obra;
- o resultado não corrigido apresenta o maior diferencial relativamente ao resultado obtido a partir de dados de obra.

Nesta fase desconheciam-se os procedimentos para atualização dos parâmetros de calibração, dependendo o processamento de dados de um programa desenvolvido especificamente para corrigir os dados inclinométricos em função das constantes instrumentais efetiva e pretendida. Por esta razão, o processo de seleção da constante instrumental iniciou-se pela avaliação do impacto das constantes disponíveis na resolução do sistema<sup>1</sup>. No quadro seguinte verifica-se que qualquer das constantes obtidas satisfaz o critério de resolução da generalidade dos sistemas inclinométricos (in ex.: 0,01 – 0,02 mm).

Quadro A20 – Impacto das constantes instrumentais determinadas na resolução do sistema.

Variante	L [mm]	K [un]	Resolução=L/K [mm]
Sem correção	500	28885	0,0173
Com correção (ClinH)	500	28775	0,0174
Com correção (ClinV)	500	28845	0,0173
Dados de obra	500	28820	0,0173

De seguida executou-se uma série de 3 medições integrais no tubo inclinométrico instalado no campus do LNEC para fins de verificação periódica dos sistemas inclinométricos (tubo-prova). Este tubo é de alumínio, de secção estreita, com cerca de 15 m de profundidade e extremamente estável. Os dados obtidos foram processados com as constantes determinadas e os desvios acumulados (in ex.: geometria) foram comparados com resultados obtidos em datas anteriores à avaria da unidade de aquisição. Nas figuras A17, A18 e A19 apresentam-se os resultados obtidos para a direção A, a direção B e a resultante, respetivamente. Nestas figuras também se incluem barras de erro que correspondem à variabilidade típica do sistema inclinométrico<sup>2</sup>, de acordo com

<sup>1</sup> Assim que se tornou possível atualizar os parâmetros de calibração, o impacto na resolução passou a ser negligente porque a unidade de aquisição multiplica o sinal sensorial pelo ganho definido, restituindo a resolução de origem do sistema.

<sup>2</sup> Neste caso, a variabilidade baseada no desvio padrão foi superior à variabilidade típica, razão pela qual se optou pela última.

$\sqrt{n/m} \varepsilon_a$ , sendo  $n = 28$  (14 m),  $\varepsilon_a = 0,15$  mm e  $m = 3$  ou  $m = 4$ , conforme se trate de uma série de medições posterior ou anterior à avaria, respetivamente.

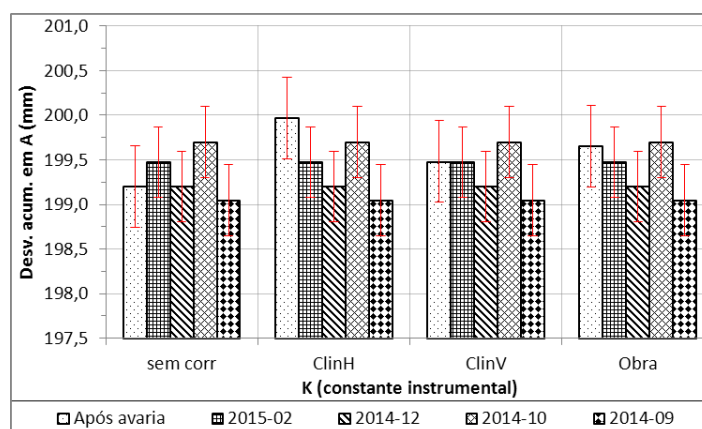


Figura A17 – Comparação entre desvios acumulados na direção *A* ao longo de 14 m.

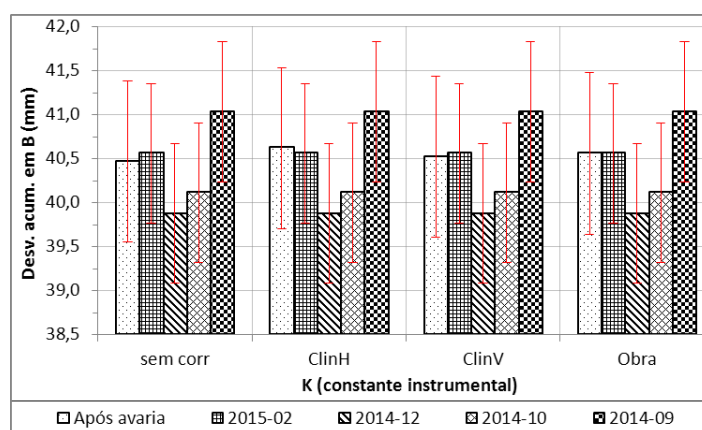


Figura A18 – Comparação entre desvios acumulados na direção *B* ao longo de 14 m.

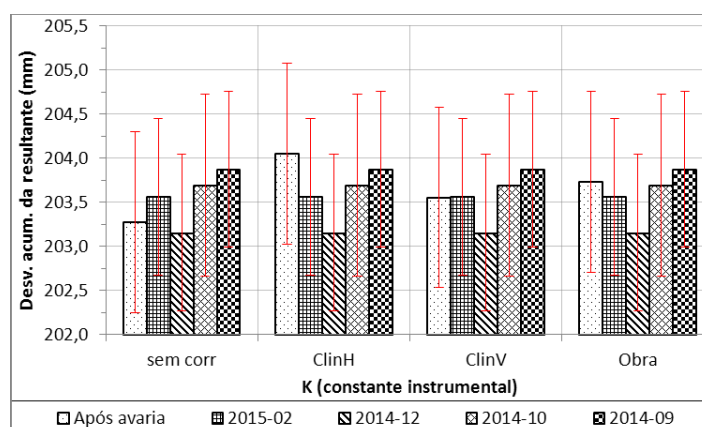


Figura A19 – Comparação entre resultantes de desvios acumulados ao longo de 14 m.

Das figuras A17 a A19 conclui-se que qualquer das constantes determinadas produz resultados enquadrados com as medições inclinométricas anteriores à avaria. Desta forma, calculou-se a dispersão entre cada grupo de desvios acumulados das figuras A17 a A19 e optou-se pela constante cujas dispersões fossem inferiores. Com base nas dispersões obtidas (quadro A21) selecionou-se a



constante 28845 (ClinV) para efeitos de correção dos dados inclinométricos.

Quadro A21 – Dispersões entre médias de desvio acumulado com diferentes constantes instrumentais.

Tipo de correção	Resultante	Direção A	Direção B
Sem correção	0,30	0,26	0,44
Com correção (ClinH)	0,34	0,37	0,45
Com correção (ClinV)	0,27	0,26	0,45
Dados de obra	0,28	0,28	0,45

### Atualização dos parâmetros de calibração

Após um período breve de operação do sistema com correção de dados baseada na constante 28845, tornou-se possível atualizar os parâmetros de calibração da unidade de aquisição. Estes parâmetros consistem em definir o ganho do sinal e o desvio na origem.

O ganho do sinal ( $g$ ) corresponde à amplificação sensorial aplicada pela unidade de aquisição, com vista à obtenção da resolução e da sensibilidade requerida. Este parâmetro corresponde à razão entre a constante de origem e a constante efetiva:

$$g = k/k_{ef} = 50000/28845 \cong 1,7334$$

No entanto, pretende-se que a resposta seja fornecida em  $mm$ , uma vez que este é o *modus operandi* do sistema, havendo também outro programa de processamento que interpreta os dados em  $mm$ . Por esta razão, o ganho foi convertido de acordo com a expressão

$$g[mm] = g L/k = 0,017334$$

O desvio na origem foi obtido a partir de dados de obra, correspondendo ao valor médio de metade da soma entre leituras de várias campanhas inclinométricas, executadas em 14 tubos distribuídos por 3 obras, totalizando 712 profundidades na direção  $A$  e 370 profundidades na direção  $B$ . Os resultados obtidos foram  $b_A = -113,9643 \text{ un} \pm 1,7988$  e  $b_B = -147,5312 \text{ un} \pm 1,9694$ . Os parâmetros inseridos são simétricos a estes valores.

Depois de atualizados os parâmetros, executaram-se novas medições no aparato laboratorial e no tubo-prova do LNEC. Estas medições demonstraram a adequabilidade dos parâmetros e o sistema mantém-se atualmente no ativo.

### Conclusões

Desta experiência podem-se retirar as conclusões seguintes:

- o método de diagnóstico e de correção de erros de sensibilidade sugerido por Coimbra (2011) é válido e fornece resultados consideravelmente razoáveis, desde que suportados por uma quantidade de dados apreciável (Anexo IX);
- as medições de verificação inclinométrica são de extrema importância; pois não só permi-

tem verificar o bom funcionamento dos sistemas, como também constituem bons padrões para efeitos de calibração e de aferição da eficácia dos procedimentos de correção;

- a calibração de instrumentos depende fundamentalmente da qualidade do padrão e dos procedimentos aplicados; fica demonstrado que é possível obterem-se bons resultados mesmo com equipamentos que aparentemente não oferecem condições metrológicas para os requisitos pretendidos.



## **ANEXO V: DISTORÇÃO MÁXIMA DE TUBOS INCLINOMÉTRICOS EM CONDIÇÕES DE “CORTE PLENO”. CASO DE OBRA DEMONSTRATIVO, VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL DO CONCEITO E ELEMENTOS DE CÁLCULO ADICIONAIS**

### **Caso de obra com interrupção prematura das observações inclinométricas**

O conceito de “corte pleno” é muito recente e as condições em que pode ocorrer não são ainda completamente conhecidas. No entanto, podem reconhecer-se alguns padrões de deformação associados a interrupções muito precoces dos programas de observação que envolvem condições geotécnicas muito específicas. Passa-se a apresentar um caso de obra deste género.

Este caso reporta-se a uma estrutura localizada no topo de uma encosta. Na sequência de um histórico de instabilidade, com registo anterior da ocorrência de deslizamentos, a encosta é objeto de um programa de observação de longo prazo. Na sequência do progresso recente de indícios de instabilidade e da degradação gradual dos dispositivos de observação, este local é atualmente objeto de obras de estabilização.

A composição litológica da encosta é complexa e variada, de origem sedimentar, consistindo em intercalações de conglomerados, brechas, arenitos e margas, sobrepostas por depósitos argilosos com siltes e areias que por vezes também ocorrem intercalados com materiais rochosos. De um modo geral, os materiais rochosos são de fraca qualidade, moderadamente a muito alterados (W3 a W4), com fracturação intensa (F4) e valores baixos de RQD. As margas caracterizam-se por uma matriz essencialmente siltosa com 10 – 20% de matéria argilosa, podendo esta atingir valores próximos de 50% em algumas áreas. De um modo geral, estas argilas apresentam potencial expansivo baixo a moderado e são pouco ativas.

Nas figuras A20 a A23 apresentam-se os perfis de deslocamento acumulado nas direções *A* e *B*, da resultante e da distorção, de dois tubos inclinométricos cuja observação foi interrompida prematuramente por impossibilidade de circulação da sonda no seu interior. Todos os tubos inclinométricos desta obra são de secção larga.

Nestas figuras observa-se um padrão comum: o desenvolvimento de zonas de progressão de deslocamentos extremamente estreitas (in ex.: entre duas medições sucessivas). Este padrão surge noutros tubos da mesma obra, em zonas rochosas ou em margas muito compactas, mas com distorções muito inferiores.

No tubo S1A (figuras A20 e A21) verifica-se que não houve observação inclinométrica entre 2012 e 2016. Quando a observação foi retomada não foi possível medir a totalidade do tubo. A distorção máxima calculada em 2012 (campanha 19) é de  $-1,1\%$  à profundidade 17,54 m. Este valor

de distorção coincide com o limite inferior do intervalo de valores máximos sugerido em 5.8.3.2 para tubos largos. A inclinação do tubo, calculada a partir da campanha de referência, oscila entre  $0,05 - 0,61^\circ$  com um valor médio de  $0,34^\circ$ .

O tubo S1B (figuras A22 e A23) ficou interrompido em dezembro de 2009 à profundidade 33,28 m. Em 2012 procedeu-se a uma campanha parcial, não tendo sido possível ultrapassar aquela profundidade. Em 2016 perdeu-se uma sonda placebo no interior deste tubo à mesma profundidade, aquando da verificação da integridade do mesmo. A distorção calculada em 2009 (campanha 18) à profundidade da interrupção é de 0,4%. Este valor de distorção fica aquém do limite inferior do intervalo de valores máximos sugerido em 5.8.3.2. No entanto, em 5.8.3.2 refere-se que nestas situações o cálculo de  $\gamma$  deve fazer-se em função dos deslocamentos incrementais. De facto, na figura A23 observa-se que a resultante dos deslocamentos da campanha 18 sofre uma redução relativamente à campanha anterior. Esta ocorrência deve-se à rotação registada na curva de deslocamentos acumulados na direção A (figura A22). Se os valores de distorção forem calculados a partir dos deslocamentos incrementais, obtém-se um máximo absoluto de 1,4% à profundidade de interrupção deste tubo. Este valor é coincidente com o limite superior do intervalo de distorções máximas sugerido em 5.8.3.2 para tubos largos. A inclinação do tubo, calculada a partir da campanha de referência, oscila entre  $0,25 - 1,16^\circ$  com um valor médio de  $0,68^\circ$ .

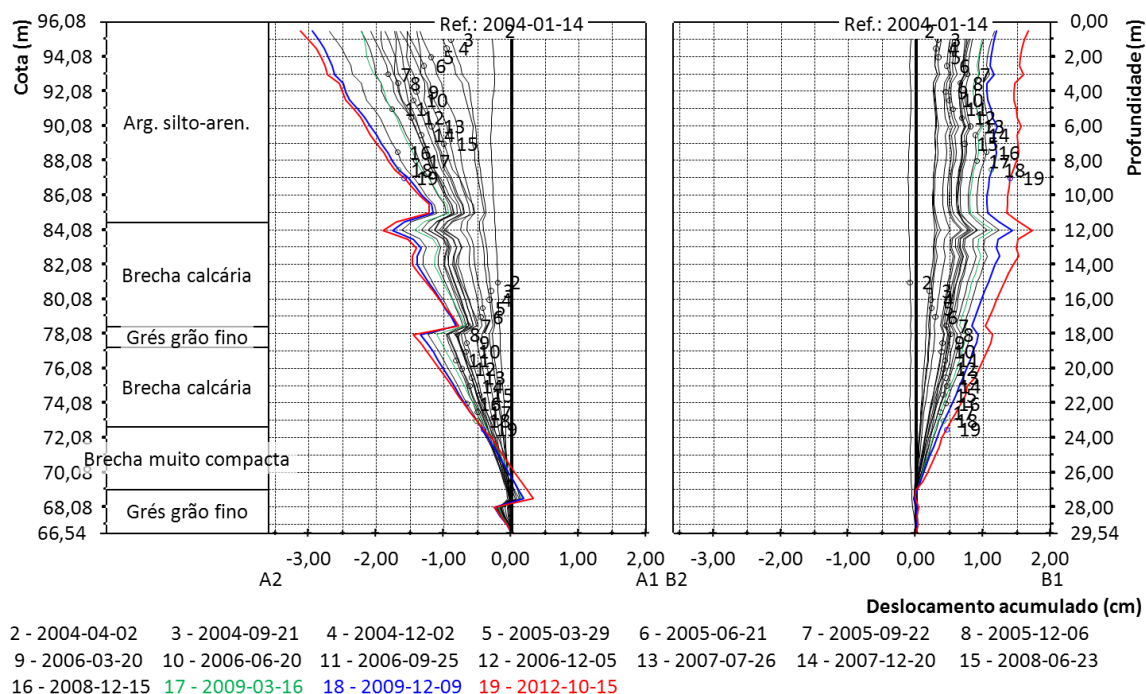


Figura A20 – Tubo S1A. Deslocamentos acumulados nas direções A e B.

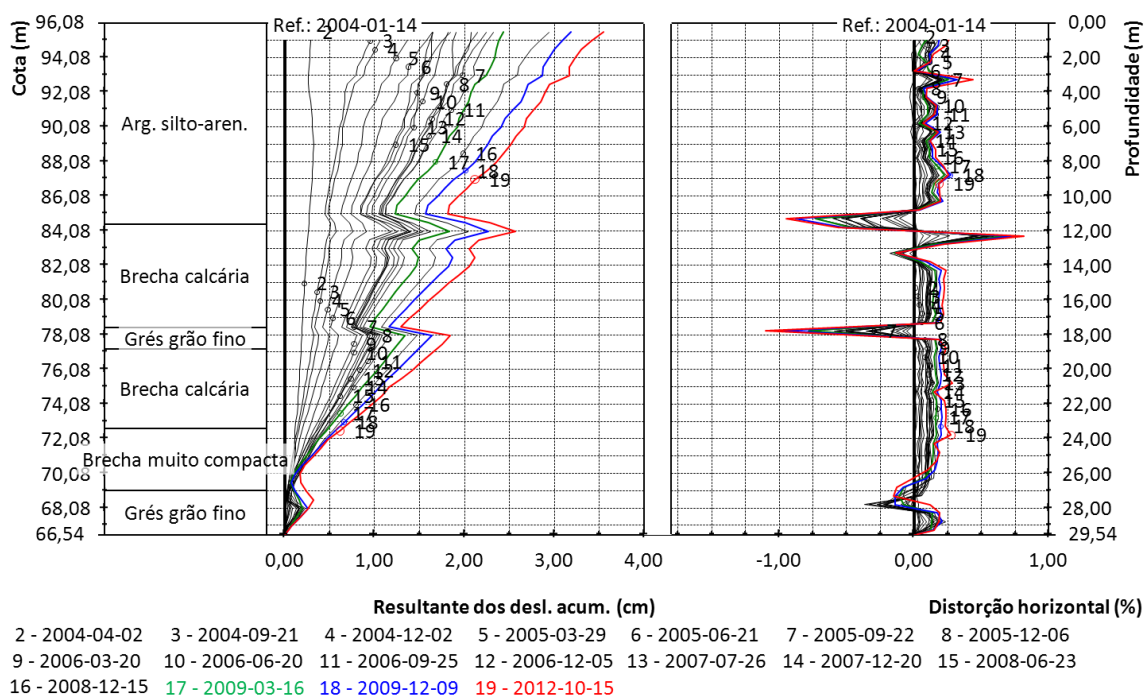


Figura A21 – Tubo S1A. Resultante dos deslocamentos acumulados e distorção horizontal.

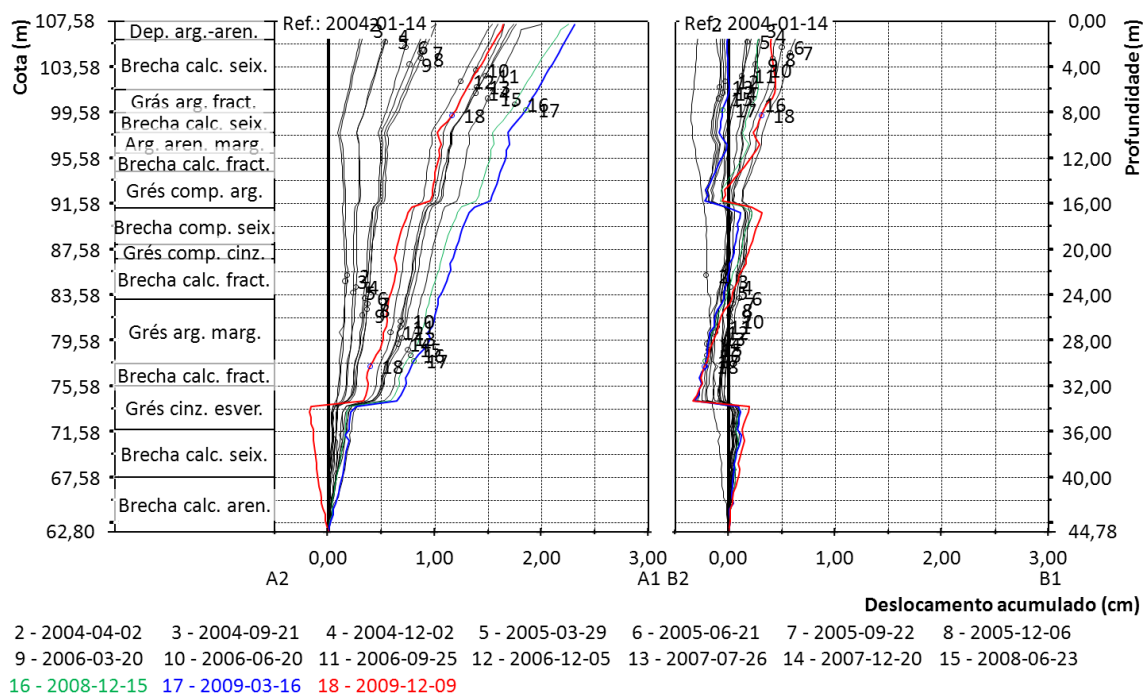


Figura A22 – Tubo S1B. Deslocamentos acumulados nas direções A e B.

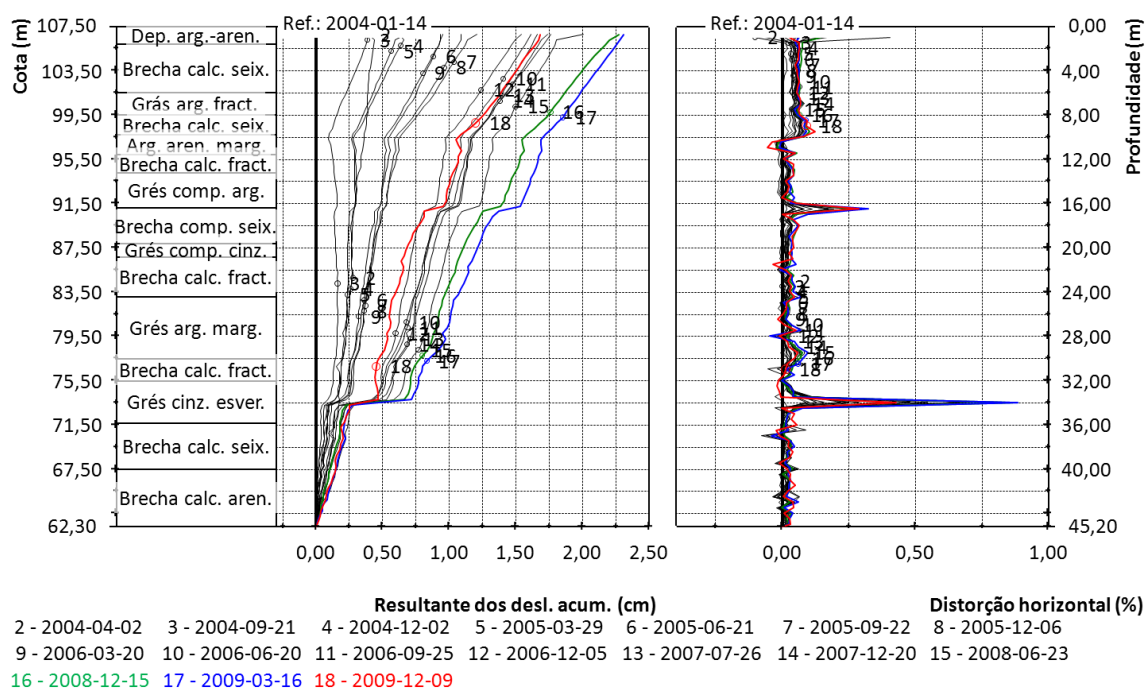


Figura A23 – Tubo S1B. Resultante dos deslocamentos acumulados e distorção horizontal.

### Validação experimental do conceito

A conclusão de tubos largos imporem maior dificuldade à circulação da sonda nestas situações parece contraintuitiva. Por esta razão, procedeu-se a um ensaio simplificado para confirmar ou refutar a concetualização teórica. O ensaio foi realizado pelo Eng. Arlindo de Sousa, pelo Técnico Superior António Coelho e pelo Bolseiro Luís Coimbra.

Dispuseram-se dois troços de tubo inclinométrico sequencialmente com um determinado desfaseamento no plano de corte (in ex.: ortogonal ao eixo longitudinal). O desfaseamento foi medido através de um paquímetro e os troços foram ligados através de talas laterais em madeira apertadas com dois grampos.

De seguida foi introduzida uma sonda inclinométrica e avaliou-se a facilidade com que a zona de desfaseamento era transposta. Este procedimento foi repetido nos três diâmetros de tubo de alumínio utilizados pelo LNEC e com várias magnitudes de desfaseamento (in ex.: desde 1 mm até 10 – 12 mm). Em cada ensaio variou-se também a inclinação do tubo para confirmar a sua influência na transposição do obstáculo.

Embora o ensaio careça da recolha sistemática de dados<sup>1</sup>, sendo também pouco provável que ocorram deformações tão demarcadas em obra<sup>2</sup>, permitiu validar a concetualização do problema. Foi possível constatar o seguinte:

<sup>1</sup> Por exemplo, a altura de queda necessária à transposição, as magnitudes dos desfaseamentos correspondentes e as inclinações do tubo em cada ensaio.

<sup>2</sup> A não ser que uma situação de “corte pleno” ocorra numa zona de união.

- a dificuldade em transpor a zona de desfasamento é muito superior em tubos largos;
- confirma-se que a inclinação do tubo influencia a distribuição de forças, de acordo com exposto na secção 5.8.3.2. Ou seja, inclinações que aumentem a componente de  $\vec{F}$  conconcor-dante com a haste de suporte das rodas são favoráveis à transposição;
- é impossível transpor a zona de desfasamento para valores de  $h$  na vizinhança de 10 mm.

#### **Elementos de cálculo adicionais: torque das molas centralizadoras e curvas de momento útil em função da magnitude da deformação**

Na secção 5.8.3.2 considera-se que o valor máximo de distorção em situação de “corte pleno” se situa no intervalo

$$(F_t^M - F_x^M) l_h/2 - \Delta\tau_m = 0 \leq \gamma_m^{cp} \leq F_t^M - F_x^M = 0$$

De acordo com o cálculo que descreve a decomposição de forças na secção 5.8.3.2, considerou-se uma força unitária  $F = 1$ , podendo entender-se este valor como a proporção de  $F$  relativamente ao peso da sonda.

Procedeu-se ao cálculo de  $\gamma$  e de  $\alpha_r$  para dimensões de  $h$  compreendidas entre 1 mm e  $r = 15,765$  mm, com passo de 1 mm. Partindo-se de  $F = 1$  e dos valores de  $\alpha_r$  determinados, procedeu-se ao cálculo das várias componentes que derivam de  $F$ , conforme descrito em 5.8.3.2. Este procedimento foi executado para os três diâmetros de tubo mais utilizados e considerando inclinações entre  $\pm 5^\circ$  com passo de  $1^\circ$ . Em resultado, obtiveram-se uma série de curvas de ajuste<sup>1</sup> que descrevem a proporção de momento favorável ( $F_t^M$ ) em função da magnitude da deformação ( $\gamma, h$ ), juntamente com valores estáticos de momento resistente ( $F_x^M$ ). Na figura A24 apresentam-se os resultados obtidos para tubos verticais ( $\varphi = 0^\circ$ ), onde se observa que em tubos largos mais de 20% do momento produzido é contraproducente nestas condições.

As interseções das curvas de  $F_t^M$  com os valores de  $F_x^M$  (figura A24) correspondem à condição  $F_t^M - F_x^M = 0$ . Desta forma, os limites superiores dos valores de  $\gamma_m^{cp}$  sugeridos na figura 68 (secção 5.8.3.2) correspondem aos pontos de interseção obtidos a partir das curvas de diferentes inclinações em cada diâmetro de tubo.

<sup>1</sup> Uma para cada inclinação, dependendo cada conjunto de curvas do diâmetro do tubo.



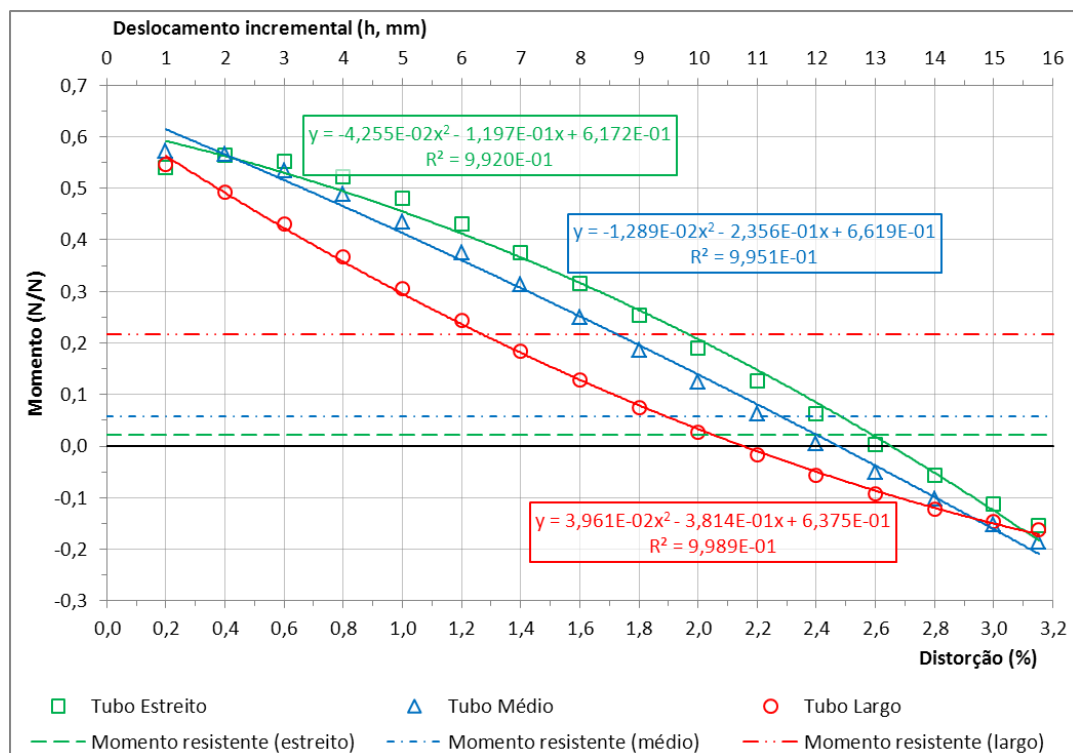


Figura A24 – Variação dos momentos favorável ( $F_t^M$ ) e resistente ( $F_x^M$ ) em função da magnitude da deformação em tubos verticais de secção estreita, média e larga.

De seguida procedeu-se à estimativa dos limites inferiores de  $\gamma_m^{cp}$  para as três secções de tubo com inclinações compreendidas no intervalo  $\pm 5^\circ$ . De acordo com a expressão (57) (secção 5.8.3.2), o torque exercido por uma mola de torção pode ser estimado de acordo com

$$\tau_m = \frac{Ed^4T}{10,8N_tD}$$

Considerando os sistemas inclinométricos mais utilizados pelo LNEC (DGSI, 2013c), estabeleceram-se as seguintes propriedades das molas:

- Módulo de elasticidade<sup>1</sup>:  $E = 193053 \text{ N/mm}^2$
- Diâmetro do fio<sup>2</sup>:  $d = 1,4 \text{ mm}$
- Número de voltas da bobine de torção<sup>2</sup>:  $N_t = 7$
- Diâmetro médio da bobine de torção<sup>2</sup>:  $D = 5,1 \text{ mm}$

O valor da rotação ( $T$ ) depende do ângulo inicial da mola, do diâmetro do tubo e do valor de  $h$ . Sabendo-se que as molas do sistema considerado (DGSI, 2013c) têm uma rotação inicial de  $90^\circ$ , e que  $\alpha_h$  corresponde ao ângulo entre o eixo longitudinal da sonda e o plano normal à haste de su-

<sup>1</sup> Adaptado de [https://dpk3n3gg92jwt.cloudfront.net/domains/century/pdf/csc\\_catalog\\_web.pdf](https://dpk3n3gg92jwt.cloudfront.net/domains/century/pdf/csc_catalog_web.pdf) (visitado em 2019-06-18), Appendix A – Material Properties, considerando-se um fio de aço inoxidável com secção redonda de  $1,4 \text{ mm}$ .

<sup>2</sup> Medição direta.

porte das rodas<sup>1</sup>, a rotação inicial pode calcular-se através da expressão

$$\frac{\frac{\pi}{2} + \alpha_h}{2\pi}$$

A rotação final pode calcular-se em função da relação

$$\frac{L_i^{min} - 2r}{l_h}$$

, onde  $L_i^{min} = L_i - h$  corresponde à largura interna do tubo quando apenas uma das rodas ultrapassa o obstáculo  $h$ ,  $2r$  é o diâmetro de roda e  $l_h$  é o comprimento da haste de suporte. Em termos geométricos, o numerador da razão corresponde ao cateto adjacente e o denominador à hipotenusa do triângulo-retângulo entre o plano da haste e o plano transversal ao tubo. Logo, a rotação final da mola após a transposição de  $h$  corresponde a

$$\frac{\frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \frac{L_i^{min} - 2r}{l_h}}{2\pi}$$

Conhecidas as rotações inicial e final das molas e sabendo-se que no sistema DGS1 (2013c) existem duas molas por cada par de rodas, o valor de  $\Delta\tau_m$  pode calcular-se através da expressão

$$\Delta\tau_m = 2 \frac{E d^4 \left( \frac{\frac{\pi}{2} + \cos^{-1} \frac{L_i^{min} - 2r}{l_h}}{2\pi} - \frac{\frac{\pi}{2} + \alpha_h}{2\pi} \right)}{10,8 N_t D}$$

Os valores de  $L_i^{min}$  e de  $\Delta\tau_m$  foram calculados para cada dimensão de  $h$ , em cada diâmetro de tubo. Com base nestes valores e nos valores de  $F_t^M$  e  $F_x^M$  determinados anteriormente, procedeu-se ao cálculo de  $\gamma$  e de  $\tau$  para cada valor de  $h$  e de  $\varphi$  nas três secções de tubo, sendo  $\tau$  o torque que resulta da expressão do limite inferior de  $\gamma_m^{cp}$ . Tendo-se utilizado um valor unitário de força nas operações anteriores ( $F = 1$ ), sendo  $F$  a proporção entre o peso da sonda e a aceleração imposta, o diferencial de torque foi dividido pelo peso da sonda, a fim de se obter um valor de  $\tau$  proporcional:

$$\tau = (F_t^M - F_x^M) \frac{l_h}{2} - \frac{\Delta\tau_m}{P}; P[N] = 1,4 \times 9,8076$$

Com base nestes resultados produziram-se séries de curvas de ajuste semelhantes às da figura A24<sup>2</sup>. Naturalmente, um valor nulo de  $\tau$  significa a anulação dos momentos. Estes valores corres-

<sup>1</sup> Note-se que a rotação inicial seria nula se a haste de suporte fosse normal ao corpo da sonda (in ex.:  $\alpha_h = 0$ ). Por isso,  $\alpha_h$  constitui um indicador direto do ângulo de rotação inicial.

<sup>2</sup> Uma para cada inclinação, dependendo cada conjunto de curvas do diâmetro de tubo.

pondem aos limites inferiores expostos na figura 68 (secção 5.8.3.2). Na figura seguinte apresentam-se as funções determinadas para os três diâmetros de tubo com inclinação  $\varphi = 0^\circ$ .

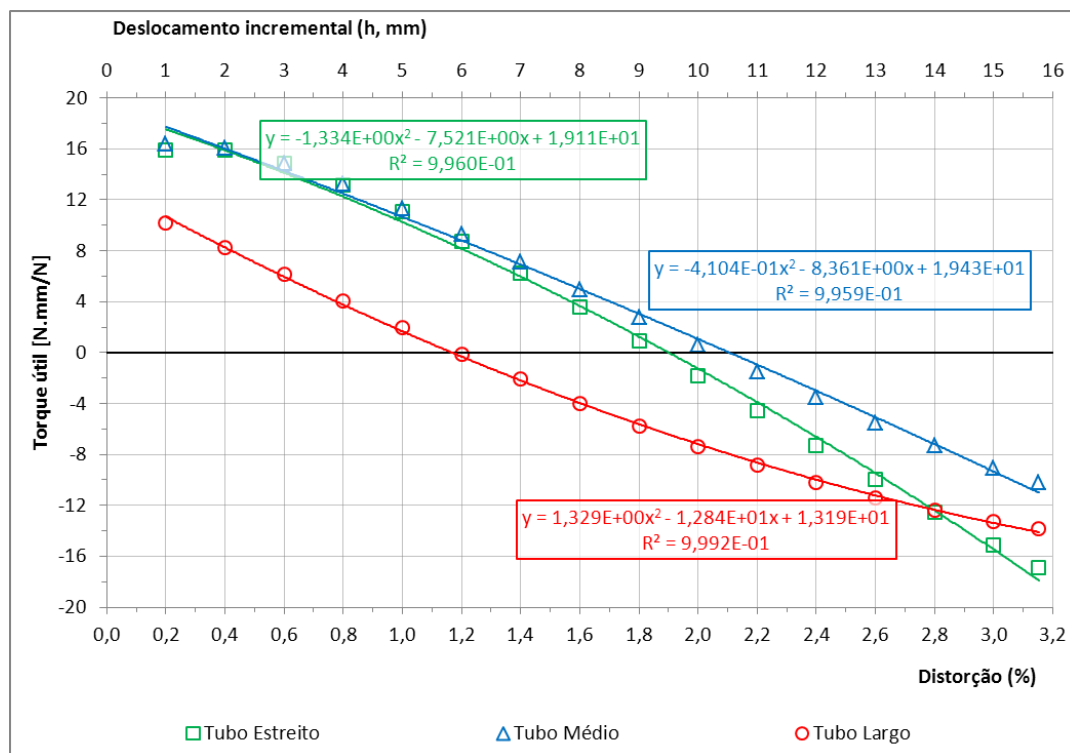


Figura A25 – Variação do torque útil ( $\tau$ ) em função da magnitude da deformação em tubos verticais de secção estreita, média e larga. Estimativas baseadas na circulação de uma sonda DGSi (2013c) com aceleração equivalente ao peso próprio.

## ANEXO VI: CORREÇÃO DE ERROS DE ALTERAÇÃO DO DESVIO NA ORIGEM. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA

### Introdução

Neste anexo clarifica-se a aplicação dos métodos de diagnóstico e de correção do erro de alteração do desvio na origem através dos dados de leitura inclinométrica (6.4.2).

Na figura 81 (6.4.2) apresentam-se os perfis de somas de leituras das campanhas 49 e 49R. Nestes perfis verifica-se que a campanha 49 apresenta uma alteração do desvio na origem parcial (in ex.: na zona inferior do tubo) e que a campanha 49R apresenta o mesmo tipo de alteração na totalidade do perfil.

### Campanha 49: alteração parcial do desvio na origem

No quadro A22 apresentam-se os dados de leitura da campanha 49, juntamente com as somas respetivas, com a média e com o desvio padrão. Neste quadro e na figura 81 (6.4.2) observa-se que a alteração do desvio ocorre desde a base do tubo até à cota 120,74 m.

Quadro A22-1 – Tubo I1. Ficha de campo da campanha de observação 49 – *continua na próxima página.*

<b>Tubo:</b>	I1	<b>Obra:</b>	MERCEANA - ESCOLA PREPARATORIA			<b>Eixo A</b>	<b>Eixo B</b>
<b>Campanha:</b>	49	<b>Data:</b>	2002-05-16		<b>Desvio padrão:</b>	16,41	20,21
<b>Referência:</b>	1	<b>Data:</b>	1996-12-27		<b>Desvio padrão:</b>	3,49	5,90
<b>Cota</b>	<b>Profundidade</b>	<b>Eixo A</b>			<b>Eixo B</b>		
(m)	(m)	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
132,74	0,46	34	-125	-91	-142	430	288
132,24	0,96	29	-118	-89	-153	435	282
131,74	1,46	-5	-86	-91	-122	404	282
131,24	1,96	-66	-24	-90	-78	363	285
130,74	2,46	-18	-71	-89	76	225	301
130,24	2,96	-32	-54	-86	99	187	286
129,74	3,46	-23	-63	-86	110	172	282
129,24	3,96	-35	-53	-88	123	161	284
128,74	4,46	-38	-51	-89	135	146	281
128,24	4,96	-49	-39	-88	145	139	284
127,74	5,46	30	-122	-92	116	171	287
127,24	5,96	17	-107	-90	159	133	292
126,74	6,46	18	-108	-90	156	137	293
126,24	6,96	14	-101	-87	163	130	293
125,74	7,46	16	-106	-90	159	131	290
125,24	7,96	-1	-89	-90	175	117	292
124,74	8,46	101	-197	-96	261	41	302
124,24	8,96	95	-185	-90	328	-33	295
123,74	9,46	86	-168	-82	335	-40	295
123,24	9,96	85	-177	-92	334	-42	292
122,74	10,46	61	-155	-94	358	-61	297

Quadro A22-2 – Tubo I1. Ficha de campo da campanha de observação 49 – *continuação*.

122,24	10,96	60	-146	-86	375	-73	302
121,74	11,46	-21	-64	-85	403	-117	286
121,24	11,96	20	-108	-88	438	-144	294
120,74	12,46	6	-133	-127	457	-201	256
120,24	12,96	3	-130	-127	450	-197	253
119,74	13,46	-6	-123	-129	461	-210	251
119,24	13,96	-37	-88	-125	473	-223	250
118,74	14,46	-109	-12	-121	292	-21	271
118,24	14,96	-146	23	-123	376	-120	256
117,74	15,46	-143	17	-126	398	-134	264
117,24	15,96	-157	41	-116	415	-174	241
116,74	16,46	-171	53	-118	442	-196	246
116,24	16,96	-177	63	-114	466	-229	237
115,74	17,46	-207	95	-112	574	-329	245
115,24	17,96	-208	85	-123	615	-352	263
114,74	18,46	-199	81	-118	598	-342	256
114,24	18,96	-241	122	-119	602	-357	245
113,74	19,46	-318	194	-124	588	-340	248
			Média:	-101,56			Média: 275,56

Na figura A26 apresentam-se os perfis de deslocamento acumulado nas direções *A* e *B* deste tubo, onde se verifica que não ocorrem deslocamentos significativos na zona de alteração do desvio na origem.

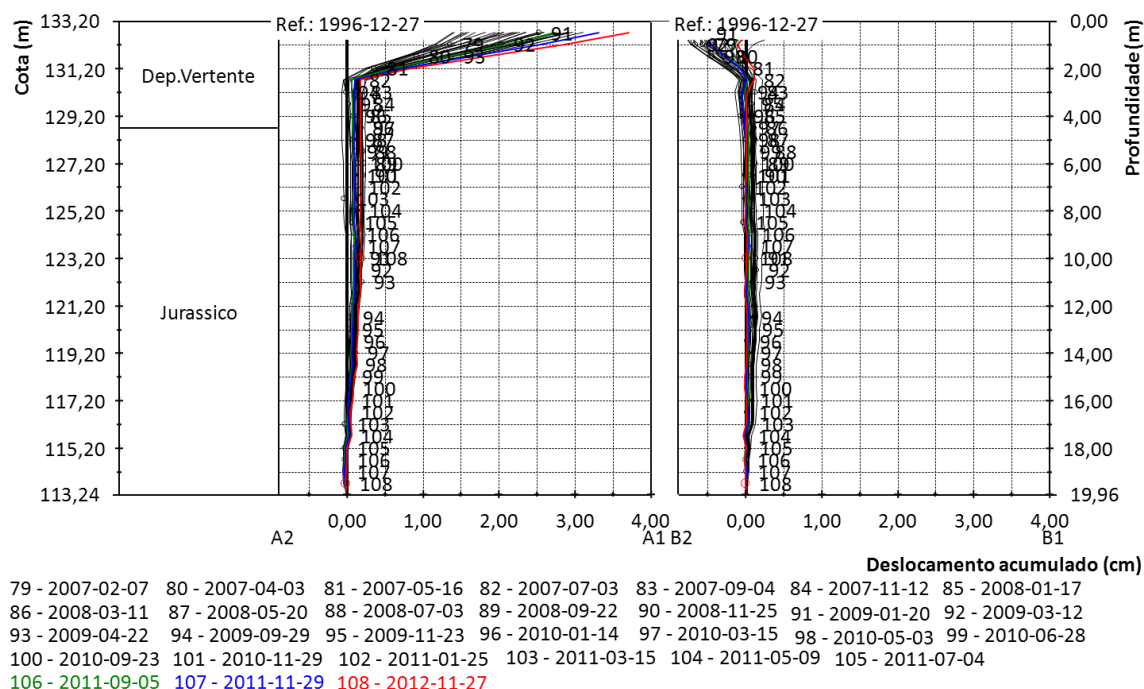


Figura A26 – Tubo I1. Perfil de deslocamentos acumulados nas direções *A* e *B* entre fevereiro de 2007 e novembro de 2012.

Visto não ocorrerem deslocamentos na zona de alteração do desvio, a zona afetada considera-se estável, podendo o erro verificar-se através da expressão (92) (6.4.2):

$$\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon'_{s,p,i} - \varepsilon'_{s,p,i}^{180}$$

Tratando-se de um sistema DGS1 (2013c),  $\varepsilon_a^A = \pm 10 \text{ un}$  e  $\varepsilon_a^B \cong \pm 20 \text{ un}$ . Assim,  $2\varepsilon_a^A/\sqrt{2} \cong \pm 14,14 \text{ un}$  e  $2\varepsilon_a^B/\sqrt{2} \cong \pm 28,28 \text{ un}$ .

A equação (92) (6.4.2) permite ainda estimar a magnitude do erro:

$$\begin{aligned} \Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180} &= \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + 2|\varepsilon_{s,i}|; \varepsilon_{s,i} = \varepsilon'_{s,i} \Rightarrow |\varepsilon_{s,i}| \pm \frac{2/\sqrt{2}}{\sqrt{2}} \varepsilon_a = \frac{|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}|}{2} \Leftrightarrow \\ \Leftrightarrow |\varepsilon_{s,i}| &= \frac{|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}|}{2} \pm \varepsilon_a \cong \frac{|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}|}{2} \end{aligned}$$

, sendo o sentido a corrigir identificado através da equação (94) (6.4.2):

$$\Delta l_i - \Delta b = \pm \varepsilon_a + \varepsilon'_{s,p,i}; \Delta b = \frac{\mu_p - \mu_r}{2}; \varepsilon_{s,i} = \varepsilon'_{s,i} \Rightarrow \varepsilon_{s,i} = \Delta l_i - \Delta b \pm \varepsilon_a \cong \Delta l_i - \Delta b$$

No quadro A23 apresentam-se os valores de  $\Delta l_i^0$ ,  $\Delta l_i^{180}$  e da subtração de ambos, com indicação da presença de erro mediante a condição  $|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}| > |2\varepsilon_a/\sqrt{2}|$ . Neste quadro apresentam-se também os valores médios daquelas variáveis, obtidos na secção de tubo onde o erro se verifica (in ex.: cotas 113,74 – 120,74 m), e o sentido a corrigir conforme indicado pela equação (94).

No quadro A23 apresentam-se ainda os valores de  $\Delta b$  utilizados na equação (94) (6.4.2). Estes valores correspondem a metade a diferença entre a média das somas de leituras da zona não afetada da campanha 49 (in ex.: cotas 121,24 – 132,74 m, com  $\mu_p^A = -89,13 \text{ un}$  e  $\mu_p^B = 290,21 \text{ un}$ ) e a média da totalidade das somas de leituras da campanha de referência (in ex.:  $\mu_r^A = -47,69 \text{ un}$  e  $\mu_r^B = -38,69 \text{ un}$ ).

No quadro A23 observa-se o seguinte:

- a condição  $|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}| > |2\varepsilon_a/\sqrt{2}|$  verifica-se tanto na zona instável como na zona de alteração do desvio, corroborando a inadequabilidade deste método em situações cuja zona afetada é instável;
- o erro verifica-se em ambas as direções, ao longo da profundidade em que os perfis de somas indicam a sua ocorrência (in ex.: cotas 113,74 – 120,74 m; figura 81, 6.4.2);
- o sentido afetado é 180° em ambas as direções (in ex.: apenas a segunda sequência de leituras foi afetada);
- o erro estimado é de 0,33 mm na direção A e de 0,43 mm na direção B. Estes valores são coincidentes com o deslocamento incremental médio, uma vez que o próprio método equivale ao cálculo do deslocamento incremental;
- o erro não se verifica em algumas secções da zona afetada. Contudo, com exceção da cota 113,74 m (direção A), os valores de  $|\Delta l_i^0 - \Delta l_i^{180}|$  são muito próximos de  $|2\varepsilon_a/\sqrt{2}|$ .

Quadro A23 – Tubo I1, campanha 49. Identificação da presença de erro em zona geotecnicaamente estável.

Cota (m)	$\Delta l_t^{40}$	$\Delta l_t^{4180}$	$\Delta l_t^{40} - \Delta l_t^{4180}$	Direção A (err)	$\Delta l_t^{80}$	$\Delta l_t^{8180}$	$\Delta l_t^{40} - \Delta l_t^{4180}$	Direção B (err)
132,74	3	-46	49	ERR	218	109	109	ERR
132,24	69	-112	181	ERR	124	201	-77	ERR
131,74	82	-126	208	ERR	83	244	-161	ERR
131,24	40	-85	125	ERR	103	228	-125	ERR
130,74	-20	-13	-7		159	173	-14	
130,24	-25	-13	-12		164	163	1	
129,74	-21	-17	-4		160	160	0	
129,24	-21	-22	1		158	167	-9	
128,74	-24	-19	-5		157	163	-6	
128,24	-22	-18	-4		162	163	-1	
127,74	-23	-19	-4		166	167	-1	
127,24	-22	-19	-3		166	162	4	
126,74	-21	-18	-3		167	163	4	
126,24	-18	-18	0		167	162	5	
125,74	-20	-22	2		164	162	2	
125,24	-23	-17	-6		166	161	5	
124,74	-27	-16	-11		156	174	-18	
124,24	-20	-22	2		168	161	7	
123,74	-19	-20	1		168	160	8	
123,24	-20	-21	1		163	163	0	
122,74	-26	-20	-6		167	162	5	
122,24	-21	-17	-4		175	159	16	
121,74	-16	-23	7		164	170	-6	
121,24	-23	-18	-5		162	166	-4	
120,74	-25	-58	33	ERR	175	120	55	ERR
120,24	-21	-58	37	ERR	166	124	42	ERR
119,74	-19	-62	43	ERR	170	119	51	ERR
119,24	-28	-49	21	ERR	169	114	55	ERR
118,74	-12	-58	46	ERR	168	130	38	ERR
118,24	-14	-60	46	ERR	165	128	37	ERR
117,74	-14	-62	48	ERR	167	140	27	
117,24	-19	-52	33	ERR	167	131	36	ERR
116,74	-22	-50	28	ERR	166	123	43	ERR
116,24	-28	-41	13		178	101	77	ERR
115,74	-1	-64	63	ERR	156	128	28	
115,24	-22	-54	32	ERR	174	131	43	ERR
114,74	-18	-53	35	ERR	170	133	37	ERR
114,24	-24	-49	25	ERR	165	119	46	ERR
113,74	-46	-39	-7		163	126	37	ERR
Média	-21	-54	33	0,33 mm	168	124	43	0,43 mm
Sentido	$\overline{\Delta l_t} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_t} - \Delta b  > \varepsilon_a$		$\overline{\Delta l_t} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_t} - \Delta b  > \varepsilon_a$	
$\Delta b_A = -20,72$ $\Delta b_B = 164,45$	0	-33	A180		3	-40	B180	

Na secção 6.4.2 referem-se duas metodologias de correção. A primeira baseia-se na equação (95) (6.4.2):

$$l_{c,p,i} = \bar{S}_i - \mu_p; \bar{S}_i = \sum S_i/n$$

, sendo neste caso a estimativa do erro correspondente a:

$$|\varepsilon_{s,i}| \cong \frac{|\bar{S}_i - \mu_p|}{2}$$

, e a segunda é baseada na equação (99) (6.4.2):

$$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = l_{p,i}^0 - (\bar{\Delta}l^0 - \bar{\Delta}l^{180}) \\ l_{c,p,i}^{180} = l_{p,i}^{180} + (\bar{\Delta}l^0 - \bar{\Delta}l^{180}) \end{cases}; \bar{\Delta}l = \sum_{i=1}^n \Delta l_i/n$$

, onde  $\bar{\Delta}l$  corresponde aos valores médios apresentados no quadro A23.

No quadro A24 apresentam-se as estimativas de erro obtidas pela equação (95) na zona afetada. Os valores obtidos são muito próximos dos que constam no quadro A23, sendo as diferenças francamente inferiores às componentes aleatórias de erro típico nas direções *A* e *B*.

Quadro A24 – Tubo I1, campanha 49. Uso do diferencial entre médias de somas de leituras para estimar o deslocamento incremental médio introduzido pelo erro de alteração do desvio na origem.

	Direção A	Direção B
Cota (m)	$S_i - \mu$ $\mu = -89,13$	$S_i - \mu$ $\mu = 290,21$
120,74	-37,87	-34,21
120,24	-37,87	-37,21
119,74	-39,87	-39,21
119,24	-35,87	-40,21
118,74	-31,87	-19,21
118,24	-33,87	-34,21
117,74	-36,87	-26,21
117,24	-26,87	-49,21
116,74	-28,87	-44,21
116,24	-24,87	-53,21
115,74	-22,87	-45,21
115,24	-33,87	-27,21
114,74	-28,87	-34,21
114,24	-29,87	-45,21
113,74	-34,87	-42,21
Média	-32,34	-38,08
Erro (mm)	-0,32	-0,38

Nas figuras A27, A28 e A29 apresentam-se, respetivamente, os perfis corrigidos das somas de lei-



turas, dos deslocamentos incrementais e dos deslocamentos acumulados da campanha 49. Nestas figuras, 49-E95 corresponde à correção da equação (95) e 49-E99 corresponde à correção da equação (99). A correção de leituras aplicou-se no sentido 180° das direções *A* e *B* entre as cotas 113,74 m e 120,74 m, inclusive. Nas figuras A27 a A29 incluem-se ainda limites de confiança baseados na componente aleatória do erro típico do sistema.

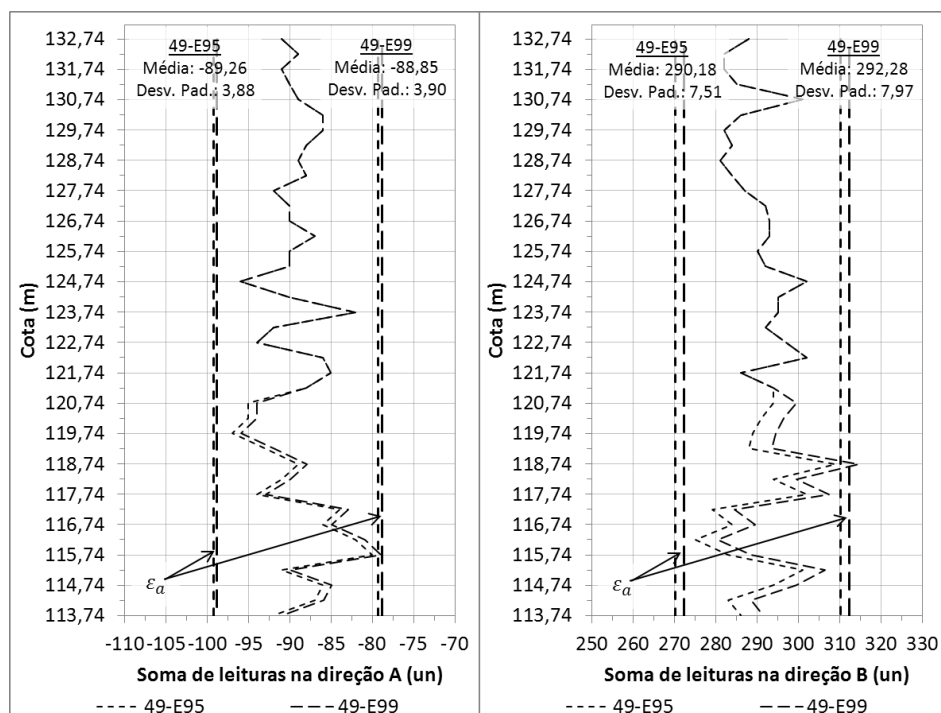


Figura A27 – Tubo I1, campanha 49. Perfil de somas de leituras corrigidas nas direções *A* e *B*.

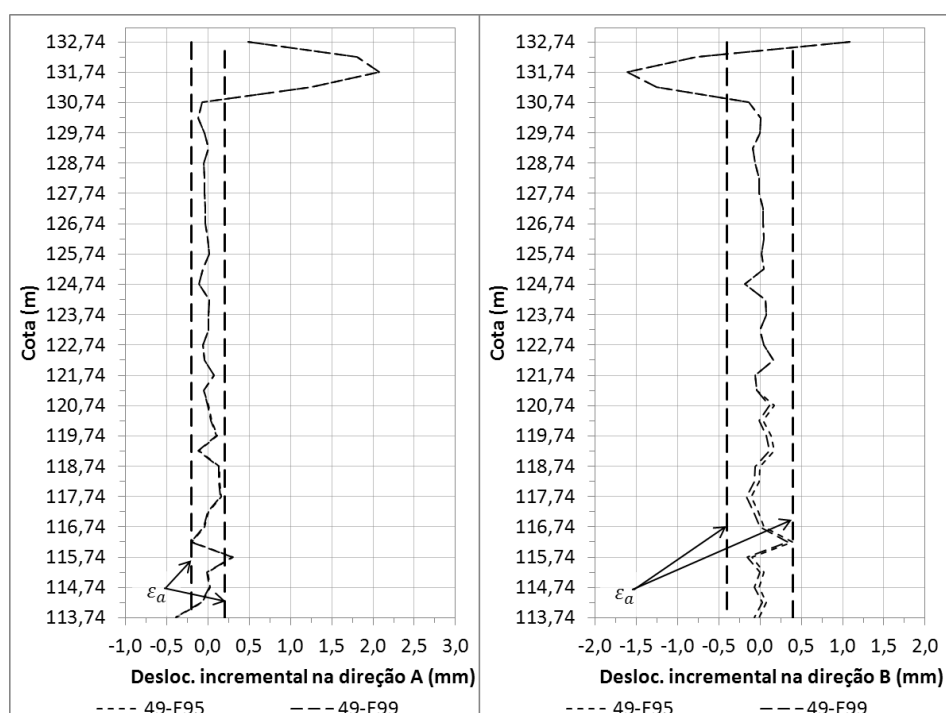


Figura A28 – Tubo I1, campanha 49. Perfil de deslocamentos incrementais corrigidos nas direções *A* e *B*.

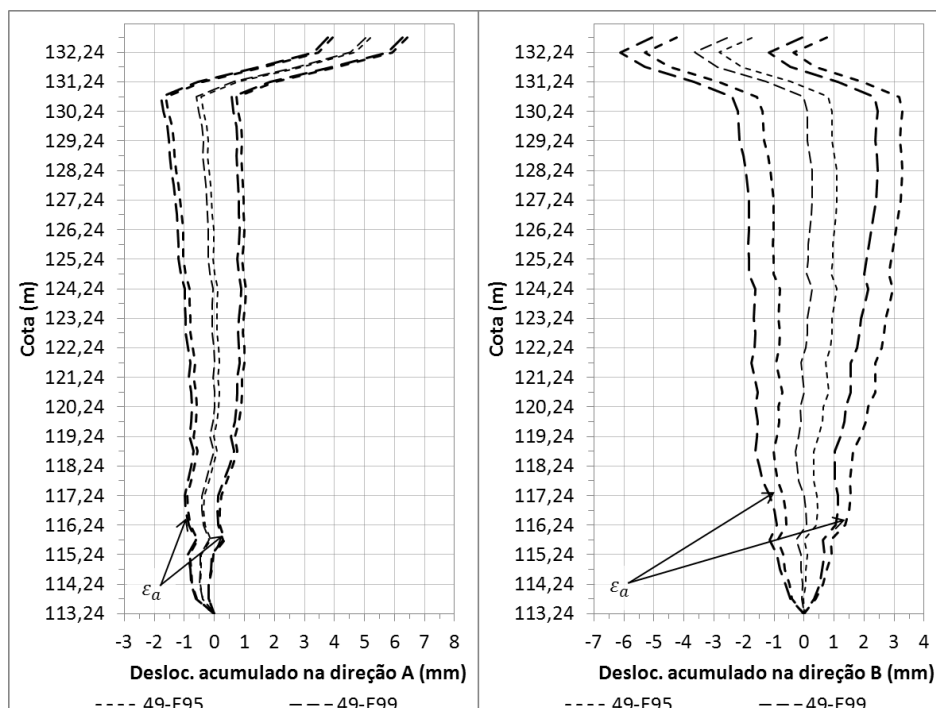


Figura A29 – Tubo I1, campanha 49. Perfil de deslocamentos acumulados corrigidos nas direções A e B.

Nas figuras A27 a A29 observa-se o seguinte:

- As diferenças entre os resultados obtidos com os dois métodos não são significativas. No que respeita aos deslocamentos acumulados, as diferenças entre os valores obtidos com as equações (95) e (99) no topo do tubo são 0,16 mm na direção A e 0,82 mm na direção B. Quando comparadas com a componente aleatória do erro típico nas direções correspondentes, as diferenças entre os dois métodos representam apenas 12,8% e 32,8% do valor admissível nas direções A e B, respetivamente.
- Ambos os métodos mantêm o padrão de forma do perfil de somas inicial (figura 81, 6.4.2). Este facto é vantajoso porque permite manter indicadores estatísticos de campanhas corrigidas e proceder à deteção de outros erros sistemáticos eventualmente presentes.

#### Campanha 49R: alteração generalizada do desvio na origem

No quadro A25 apresentam-se os dados de leitura da campanha 49R, juntamente com as somas respetivas, com a média e com o desvio padrão. Embora os deslocamentos incrementais e acumulados desta campanha demonstrem claramente a presença de um erro (figura 77, 6.3.3; figura 80, 6.4.2), neste quadro e na figura 81 (6.4.2) não se verifica uma alteração demarcada do desvio na origem ao longo da profundidade (com exceção das três profundidades mais superficiais). Este facto verifica-se porque, ao contrário do que acontece na campanha 49, a alteração do desvio na origem é generalizada (in ex.: dá-se entre as sequências de leituras nos sentidos 0° e 180°).

Quadro A25 – Tubo I1. Ficha de campo da campanha de observação 49R.

Tubo:	I1	Obra:	MERCEANA - ESCOLA PREPARATORIA			Eixo A	Eixo B
Campanha:	49R	Data:	2002-05-28		Desvio padrão:	7,78	11,16
Referência:	1	Data:	1996-12-27		Desvio padrão:	3,49	5,90
Cota	Profundidade	Eixo A			Eixo B		
(m)	(m)	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
132,74	0,46	18	-163	-145	-148	393	245
132,24	0,96	21	-164	-143	-163	408	245
131,74	1,46	-21	-125	-146	-135	378	243
131,24	1,96	-67	-56	-123	-79	338	259
130,74	2,46	-28	-98	-126	79	206	285
130,24	2,96	-39	-82	-121	92	171	263
129,74	3,46	-29	-91	-120	109	160	269
129,24	3,96	-41	-79	-120	124	142	266
128,74	4,46	-45	-78	-123	137	127	264
128,24	4,96	-54	-67	-121	146	122	268
127,74	5,46	23	-151	-128	108	150	258
127,24	5,96	13	-136	-123	156	114	270
126,74	6,46	16	-136	-120	155	117	272
126,24	6,96	8	-128	-120	163	108	271
125,74	7,46	11	-136	-125	158	113	271
125,24	7,96	-5	-117	-122	173	98	271
124,74	8,46	96	-227	-131	260	27	287
124,24	8,96	89	-213	-124	326	-50	276
123,74	9,46	80	-198	-118	333	-58	275
123,24	9,96	81	-206	-125	335	-60	275
122,74	10,46	58	-182	-124	354	-82	272
122,24	10,96	56	-176	-120	373	-92	281
121,74	11,46	-26	-93	-119	403	-132	271
121,24	11,96	14	-140	-126	439	-166	273
120,74	12,46	3	-124	-121	458	-186	272
120,24	12,96	-1	-121	-122	450	-178	272
119,74	13,46	-10	-114	-124	462	-190	272
119,24	13,96	-39	-77	-116	473	-205	268
118,74	14,46	-112	-7	-119	296	-4	292
118,24	14,96	-151	33	-118	380	-103	277
117,74	15,46	-151	24	-127	401	-107	294
117,24	15,96	-161	48	-113	414	-154	260
116,74	16,46	-176	62	-114	440	-175	265
116,24	16,96	-185	71	-114	467	-201	266
115,74	17,46	-213	103	-110	574	-307	267
115,24	17,96	-212	93	-119	620	-336	284
114,74	18,46	-204	89	-115	602	-320	282
114,24	18,96	-244	127	-117	606	-331	275
113,74	19,46	-318	200	-118	593	-320	273
		Média:	-122,56		Média:	270,49	

Na secção 6.4.2 refere-se que a média das somas da campanha anterior<sup>1</sup> se pode utilizar quando a

<sup>1</sup> Neste caso, a média das somas da campanha 49.

alteração do desvio se dá entre sequências de leituras. Esta prática apoia-se no facto de, normalmente,  $\mu$  não variar significativamente ao longo do tempo. Contudo, é importante reter que podem ocorrer variações subtis da média das somas com implicações gravosas, assim como se podem verificar alterações pronunciadas da mesma sem impacto aparente nas medições inclinométricas. A figura 74 (6.3.2) é um bom exemplo desta afirmação, já que a média das somas da campanha 49R não tem especial destaque relativamente aos valores doutras campanhas.

A campanha 49R sofre alterações que são notoriamente diferentes nas três secções do topo do tubo (figura 81, 6.4.2; quadro A25). Por esta razão, será preferível utilizar-se a equação (93) (6.4.2) para confirmar a presença do erro:

$$\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a + \varepsilon'_{s,p,i}{}^0 + \varepsilon'_{s,p,i}{}^{180}; 2\Delta b = \mu_p - \mu_r$$

, onde  $2\Delta b$  representa a diferença entre médias de somas de leituras, neste caso entre as médias das somas de leituras da campanha anterior (in ex.: 49) e a da campanha de referência (in ex.:  $2\Delta b = \mu_{p-1} - \mu_r$ ).

Sabendo-se que  $\mu_{p-1}^A = -88,85 \text{ un}$ ,  $\mu_{p-1}^B = 292,28 \text{ un}$  (figura A27),  $\mu_r^A = -47,69 \text{ un}$  e  $\mu_r^B = -38,69 \text{ un}$ , tem-se  $2\Delta b_A = -41,16 \text{ un}$  e  $2\Delta b_B = 330,97 \text{ un}$ .

A magnitude do erro pode estimar-se também através da equação (93) (6.4.2):

$$|\varepsilon_{s,i}| = \frac{|\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b|}{2} \pm \varepsilon_a \cong \frac{|\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b|}{2}$$

, sendo a correção executada de acordo com a equação (100) (6.4.2):

$$l_{c,p,i} = l_{p,i} - (\bar{\Delta l}^0 + \bar{\Delta l}^{180} - 2\Delta b)$$

No quadro A26 apresentam-se as estimativas de erro produzidas através da equação (93), juntamente com o sentido a corrigir determinado pela equação (94) (6.4.2). No quadro A27 apresentam-se as estimativas de erro com base na equação (95).

Quadro A26-1 – Tubo I1, campanha 49R. Identificação da presença de erro através da equação (93) (6.4.2) – continua na próxima página.

Cota (m)	$\Delta l_i^{40}$	$\Delta l_i^{180}$	$\Delta l_i^{40} + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b$	Direção A (err)	$\Delta l_i^{80}$	$\Delta l_i^{180}$	$\Delta l_i^{80} + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b$	Direção B (err)
132,74	-13	-84	-56	ERR	212	72	-47	ERR
132,24	61	-158	-56	ERR	114	174	-43	ERR
131,74	66	-165	-58	ERR	70	218	-43	ERR
131,24	39	-117	-37	ERR	102	203	-26	
130,74	-30	-40	-29	ERR	162	154	-15	
130,24	-32	-41	-32	ERR	157	147	-27	

Quadro A26-2 – Tubo I1, campanha 49R. Identificação da presença de erro através da equação (93) (6.4.2) – *continuação*.

129,74	-27	-45	-31	ERR	159	148	-24	
129,24	-27	-48	-34	ERR	159	148	-24	
128,74	-31	-46	-36	ERR	159	144	-28	
128,24	-27	-46	-32	ERR	163	146	-22	
127,74	-30	-48	-37	ERR	158	146	-27	
127,24	-26	-48	-33	ERR	163	143	-25	
126,74	-23	-46	-28	ERR	166	143	-22	
126,24	-24	-45	-28	ERR	167	140	-24	
125,74	-25	-52	-36	ERR	163	144	-24	
125,24	-27	-45	-31	ERR	164	142	-25	
124,74	-32	-46	-37	ERR	155	160	-16	
124,24	-26	-50	-35	ERR	166	144	-21	
123,74	-25	-50	-34	ERR	166	142	-23	
123,24	-24	-50	-33	ERR	164	145	-22	
122,74	-29	-47	-35	ERR	163	141	-27	
122,24	-25	-47	-31	ERR	173	140	-18	
121,74	-21	-52	-32	ERR	164	155	-12	
121,24	-29	-50	-38	ERR	163	144	-24	
120,74	-28	-49	-36	ERR	176	135	-20	
120,24	-25	-49	-33	ERR	166	143	-22	
119,74	-23	-53	-35	ERR	171	139	-21	
119,24	-30	-38	-27	ERR	169	132	-30	ERR
118,74	-15	-53	-27	ERR	172	147	-12	
118,24	-19	-50	-28	ERR	169	145	-17	
117,74	-22	-55	-36	ERR	170	167	6	
117,24	-23	-45	-27	ERR	166	151	-14	
116,74	-27	-41	-27	ERR	164	144	-23	
116,24	-36	-33	-28	ERR	179	129	-23	
115,74	-7	-56	-22	ERR	156	150	-25	
115,24	-26	-46	-31	ERR	179	147	-5	
114,74	-23	-45	-31	ERR	174	155	-2	
114,24	-27	-44	-30	ERR	169	145	-17	
113,74	-45	-55	-35	ERR	168	146	-17	
Média	38	-136	-57	-0,57 mm	132	155	-44	-0,44 mm
Média	-24	-49	-32	-0,32 mm	164	147	-20	-0,2 mm
Sentido	$\overline{\Delta l_i} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_i} - \Delta b  > \varepsilon_a$		$\overline{\Delta l_i} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_i} - \Delta b  > \varepsilon_a$	
$\Delta b_A = -20,58$ $\Delta b_B = 165,49$	-4	-28	A180		-1	-18	Nenhum	
	Cotas 113,74 m a 131,24 m					Cotas 113,74 m a 131,24 m		

Quadro A27 – Tubo I1, campanha 49R. Identificação da presença de erro através da equação (95) (6.4.2).

	Direção A	Direção B
Cota (m)	$S_i - \mu$ $\mu = -88,85$	$S_i - \mu$ $\mu = 292,28$
132,74	-56,15	-47,28
132,24	-54,15	-47,28
131,74	-57,15	-49,28
131,24	-34,15	-33,28
130,74	-37,15	-7,28
130,24	-32,15	-29,28
129,74	-31,15	-23,28
129,24	-31,15	-26,28
128,74	-34,15	-28,28
128,24	-32,15	-24,28
127,74	-39,15	-34,28
127,24	-34,15	-22,28
126,74	-31,15	-20,28
126,24	-31,15	-21,28
125,74	-36,15	-21,28
125,24	-33,15	-21,28
124,74	-42,15	-5,28
124,24	-35,15	-16,28
123,74	-29,15	-17,28
123,24	-36,15	-17,28
122,74	-35,15	-20,28

122,24	-31,15	-11,28
121,74	-30,15	-21,28
121,24	-37,15	-19,28
120,74	-32,15	-20,28
120,24	-33,15	-20,28
119,74	-35,15	-20,28
119,24	-27,15	-24,28
118,74	-30,15	-0,28
118,24	-29,15	-15,28
117,74	-38,15	1,72
117,24	-24,15	-32,28
116,74	-25,15	-27,28
116,24	-25,15	-26,28
115,74	-21,15	-25,28
115,24	-30,15	-8,28
114,74	-26,15	-10,28
114,24	-28,15	-17,28
113,74	-29,15	-19,28
Média	-55,82	-47,95
Erro (mm)	-0,56	-0,48
Média	-31,88	-19,62
Erro (mm)	-0,32	-0,20

Nos quadros A26 e A27 observa-se:

- as estimativas de erro obtidas pelos dois métodos são muito próximas;
- o erro estimado entre as cotas 113,74 – 132,24 m na direção B é desprezável quando comparado com o valor típico de erro aleatório. Contudo, os deslocamentos acumulados não corrigidos demonstram que este erro é significativo (figura 77, 6.3.3).

Os deslocamentos incrementais médios (figura 80, 6.4.2), obtidos em zona estável (in ex.: cotas 113,74 – 120,24 m) são de 0,22 mm nas direções A e B. Este valor difere das estimativas produzidas 0,10 mm na direção A (quadros A26 e A27). Uma diferença de 0,10 mm na direção A corresponde a  $0,5\varepsilon_a$  (50%) e representa um erro sistemático de 3,90 mm ao longo da profundidade total da instalação (figura A30). Este erro é inaceitável, concluindo-se que a média utilizada para a direção A (in ex.: a da campanha 49) não é adequada, tendo ocorrido uma alteração efetiva do desvio na origem desta direção entre as campanhas 49 e 49R.

Quando uma situação destas ocorre é possível produzir uma estimativa mais correta da média das

somas por aplicação da equação (92) em zona estável. No quadro A28 apresentam-se os parâmetros de correção obtidos através da equação (92) entre as cotas 113,74 – 120,24 m. No quadro A29 apresentam-se as leituras corrigidas pela equação (99) entre as cotas 113,74 – 131,24 m, incluindo-se as somas das mesmas, a média e o desvio padrão respectivos. O sentido corrigido foi o inverso (in ex.: 180°) em ambas as direções, tal como determinado no quadro A26.

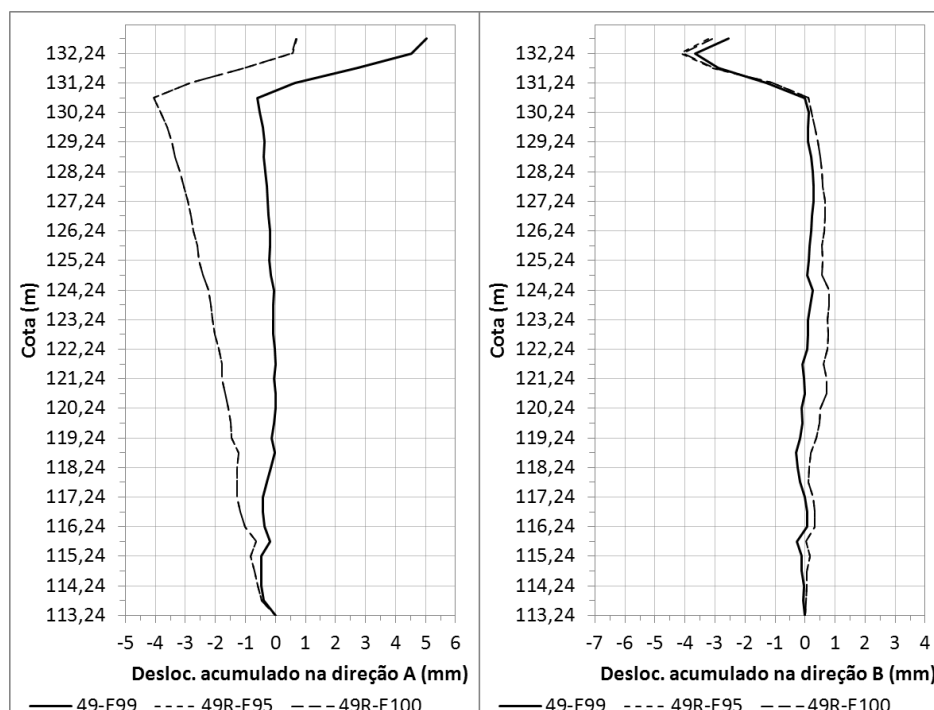


Figura A30 – Correção dos deslocamentos acumulados da campanha 49R com o valor de  $\mu$  da campanha 49.

Quadro A28 – Tubo I1, campanha 49R. Estimativas de erro a partir da equação (92) (6.4.2) em zona estável.

Cota (m)	$\Delta l_i^{40}$	$\Delta l_i^{4180}$	$\Delta l_i^{40} - \Delta l_i^{4180}$	Direção A (err)	$\Delta l_i^{80}$	$\Delta l_i^{8180}$	$\Delta l_i^{80} - \Delta l_i^{8180}$	Direção B (err)
120,74	-28	-49	21	ERR	176	135	41	ERR
120,24	-25	-49	24	ERR	166	143	23	
119,74	-23	-53	30	ERR	171	139	32	ERR
119,24	-30	-38	8		169	132	37	ERR
118,74	-15	-53	38	ERR	172	147	25	
118,24	-19	-50	31	ERR	169	145	24	
117,74	-22	-55	33	ERR	170	167	3	
117,24	-23	-45	22	ERR	166	151	15	
116,74	-27	-41	14		164	144	20	
116,24	-36	-33	-3		179	129	50	ERR
115,74	-7	-56	49	ERR	156	150	6	
115,24	-26	-46	20	ERR	179	147	32	ERR
114,74	-23	-45	22	ERR	174	155	19	
114,24	-27	-44	17	ERR	169	145	24	
113,74	-46	-33	-13		168	146	22	
Média	-25	-46	21	0,21 mm	170	145	25	0,25 mm

Quadro A29 – Tubo I1, campanha 49R. Leituras corrigidas entre as cotas 113,74 – 131,24 m através da equação (99) (6.4.2).

Cota (m)	Prof. (m)	Eixo A			Eixo B		
		0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
131,24	1,96	-67	-77	-144	-79	313	234
130,74	2,46	-28	-119	-147	79	181	260
130,24	2,96	-39	-103	-142	92	146	238
129,74	3,46	-29	-112	-141	109	135	244
129,24	3,96	-41	-100	-141	124	117	241
128,74	4,46	-45	-99	-144	137	102	239
128,24	4,96	-54	-88	-142	146	97	243
127,74	5,46	23	-172	-149	108	125	233
127,24	5,96	13	-157	-144	156	89	245
126,74	6,46	16	-157	-141	155	92	247
126,24	6,96	8	-149	-141	163	83	246
125,74	7,46	11	-157	-146	158	88	246
125,24	7,96	-5	-138	-143	173	73	246
124,74	8,46	96	-248	-152	260	2	262
124,24	8,96	89	-234	-145	326	-75	251
123,74	9,46	80	-219	-139	333	-83	250
123,24	9,96	81	-227	-146	335	-85	250
122,74	10,46	58	-203	-145	354	-107	247
122,24	10,96	56	-197	-141	373	-117	256
121,74	11,46	-26	-114	-140	403	-157	246
121,24	11,96	14	-161	-147	439	-191	248
120,74	12,46	3	-145	-142	458	-211	247
120,24	12,96	-1	-142	-143	450	-203	247
119,74	13,46	-10	-135	-145	462	-215	247
119,24	13,96	-39	-98	-137	473	-230	243
118,74	14,46	-112	-28	-140	296	-29	267
118,24	14,96	-151	12	-139	380	-128	252
117,74	15,46	-151	3	-148	401	-132	269
117,24	15,96	-161	27	-134	414	-179	235
116,74	16,46	-176	41	-135	440	-200	240
116,24	16,96	-185	50	-135	467	-226	241
115,74	17,46	-213	82	-131	574	-332	242
115,24	17,96	-212	72	-140	620	-361	259
114,74	18,46	-204	68	-136	602	-345	257
114,24	18,96	-244	106	-138	606	-356	250
113,74	19,46	-318	179	-139	593	-345	248
		Média:	-141,72		Média:	247,67	
		Desv. Pad.:	4,50		Desv. Pad.:	8,46	

Partindo-se das médias expostas no quadro A29, as estimativas produzidas pelas equações (93) e (95) podem reproduzir-se com melhores resultados. Nos quadros A30 e A31 apresentam-se estes resultados, podendo-se observar o seguinte:



- os valores de erro obtidos entre as cotas 113,74 – 131,24 m são agora mais próximos do deslocamento incremental médio;
- verifica-se que agora o sentido a corrigir é 0° em ambas as direções<sup>1</sup>;
- ao contrário do que seria esperado, verifica-se que não ocorre erro nas três secções superiores do tubo<sup>2</sup> (113,74 – 131,24 m), sendo a correção necessária apenas na zona inferior.

Quadro A30-1 – Tubo I1, campanha 49R. Parâmetros de correção obtidos pela equação (93) (6.4.2) com  $\mu_p$  determinada pela equação (92) (6.4.2) em zona estável – *continua na próxima página*.

Cota (m)	$\Delta l_i^{40}$	$\Delta l_i^{180}$	$\Delta l_i^{40} + \Delta l_i^{180}$ $- 2\Delta b$	Direção A (err)	$\Delta l_i^{90}$	$\Delta l_i^{270}$	$\Delta l_i^{90} + \Delta l_i^{270}$ $- 2\Delta b$	Direção B (err)
132,74	-13	-84	-3		212	72	-2	
132,24	61	-158	-3		114	174	2	
131,74	66	-165	-5		70	218	2	
131,24	39	-117	16	ERR	102	203	19	
130,74	-30	-40	24	ERR	162	154	30	ERR
130,24	-32	-41	21	ERR	157	147	18	
129,74	-27	-45	22	ERR	159	148	21	
129,24	-27	-48	19	ERR	159	148	21	
128,74	-31	-46	17	ERR	159	144	17	
128,24	-27	-46	21	ERR	163	146	23	
127,74	-30	-48	16	ERR	158	146	18	
127,24	-26	-48	20	ERR	163	143	20	
126,74	-23	-46	25	ERR	166	143	23	
126,24	-24	-45	25	ERR	167	140	21	
125,74	-25	-52	17	ERR	163	144	21	
125,24	-27	-45	22	ERR	164	142	20	
124,74	-32	-46	16	ERR	155	160	29	ERR
124,24	-26	-50	18	ERR	166	144	24	
123,74	-25	-50	19	ERR	166	142	22	
123,24	-24	-50	20	ERR	164	145	23	
122,74	-29	-47	18	ERR	163	141	18	
122,24	-25	-47	22	ERR	173	140	27	
121,74	-21	-52	21	ERR	164	155	33	ERR
121,24	-29	-50	15	ERR	163	144	21	
120,74	-28	-49	17	ERR	176	135	25	
120,24	-25	-49	20	ERR	166	143	23	
119,74	-23	-53	18	ERR	171	139	24	
119,24	-30	-38	26	ERR	169	132	15	
118,74	-15	-53	26	ERR	172	147	33	ERR

<sup>1</sup> Note-se que a determinação do sentido a corrigir é dependente do sentido corrigido pela equação (92) em zona estável para obtenção do valor de  $\mu$ . Neste caso, a correção do sentido 180° pelas equações (93) e (95) implicaria também a correção das secções superiores (in ex.: em consequência do valor de  $\mu$  obtido por aplicação da equação (92) no sentido 0°). Embora não se apresentem aqui estes resultados, observou-se que a média de somas obtida através da equação (92) aplicada ao sentido 0° em zona estável introduz inconsistências nas estimativas de erro e na determinação dos sentidos a corrigir. Ainda assim, os resultados finais não divergem significativamente dos que aqui se apresentam. Este exercício de hipótese deve fazer-se sempre que o erro de alteração do desvio impede a determinação da média das somas com algum grau de fiabilidade.

<sup>2</sup> Ou seja, o processo de estimativa e de correção poderia ter-se realizado com base na média das somas das três secções superiores, mas a confirmação deste facto exigiu a análise de leituras numa zona estável do tubo.

Quadro A30-2 – Tubo I1, campanha 49R. Parâmetros de correção obtidos pela equação (93) (6.4.2) com  $\mu_p$  determinada através da equação (92) (6.4.2) em zona estável – *continuação*.

118,24	-19	-50	25	ERR	169	145	28	
117,74	-22	-55	17	ERR	170	167	51	ERR
117,24	-23	-45	26	ERR	166	151	31	ERR
116,74	-27	-41	26	ERR	164	144	22	
116,24	-36	-33	25	ERR	179	129	22	
115,74	-7	-56	31	ERR	156	150	20	
115,24	-26	-46	22	ERR	179	147	40	ERR
114,74	-23	-45	26	ERR	174	155	43	ERR
114,24	-27	-44	23	ERR	169	145	28	
113,74	-40	-33	15	ERR	168	146	28	
Média	38	-136	-4	-0,04 mm	132	155	0	0 mm
Média	-24	-49	21	0,21 mm	164	147	25	0,25 mm
Sentido	$\overline{\Delta l_i} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_i} - \Delta b  > \varepsilon_a$		$\overline{\Delta l_i} - \Delta b$		$ \overline{\Delta l_i} - \Delta b  > \varepsilon_a$	
$\Delta b_A = -47,02$ $\Delta b_B = 143,18$	23	-2	A0		21	4	B0	
	Cotas 113,74 m a 131,24 m				Cotas 113,74 m a 131,24 m			

Quadro A31 – Tubo I1, campanha 49R. Parâmetros de correção obtidos pela equação (95) (6.4.2) com  $\mu_p$  determinada através da equação (92) (6.4.2) em zona estável.

	Direção A	Direção B
Cota (m)	$S_i - \mu$ $\mu = -141,72$	$S_i - \mu$ $\mu = 247,67$
132,74	-3,28	-2,67
132,24	-1,28	-2,67
131,74	-4,28	-4,67
131,24	18,72	11,33
130,74	15,72	37,33
130,24	20,72	15,33
129,74	21,72	21,33
129,24	21,72	18,33
128,74	18,72	16,33
128,24	20,72	20,33
127,74	13,72	10,33
127,24	18,72	22,33
126,74	21,72	24,33
126,24	21,72	23,33
125,74	16,72	23,33
125,24	19,72	23,33
124,74	10,72	39,33
124,24	17,72	28,33
123,74	23,72	27,33
123,24	16,72	27,33
122,74	17,72	24,33

122,24	21,72	33,33
121,74	22,72	23,33
121,24	15,72	25,33
120,74	20,72	24,33
120,24	19,72	24,33
119,74	17,72	24,33
119,24	25,72	20,33
118,74	22,72	44,33
118,24	23,72	29,33
117,74	14,72	46,33
117,24	28,72	12,33
116,74	27,72	17,33
116,24	27,72	18,33
115,74	31,72	19,33
115,24	22,72	36,33
114,74	26,72	34,33
114,24	24,72	27,33
113,74	23,72	26,33
Média	-2,94	-3,33
Erro (mm)	-0,03	-0,03
Média	21,00	25,00
Erro (mm)	0,21	0,25
	Cotas 113,74 m a 131,24 m	

Então, as correções podem aplicar-se através das equações (95) e (100), utilizando-se os parâmetros apresentados nos quadros A30 e A31. Nas figuras A31, A32 e A33 apresentam-se, respectivamente, os perfis corrigidos das somas de leituras, dos deslocamentos incrementais e dos deslocamentos acumulados da campanha 49R. Nestas figuras, 49R-E95 e 49R-E100 representam as curvas corrigidas pelas equações (95) e (100), respectivamente.

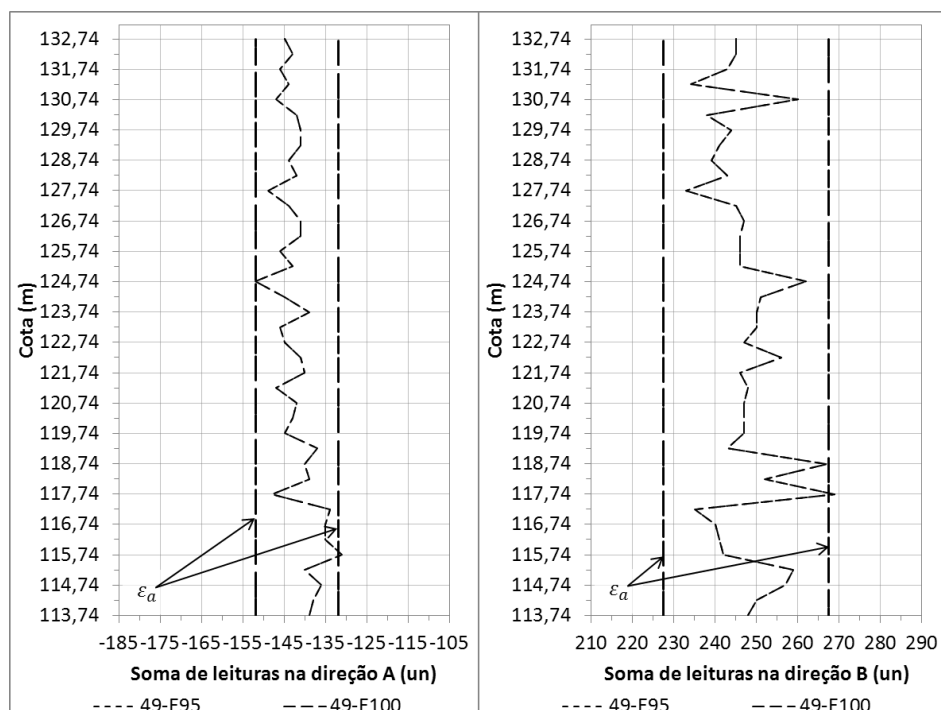


Figura A31 – Tubo I1, campanha 49R. Perfil de somas de leituras corrigidas nas direções A e B.

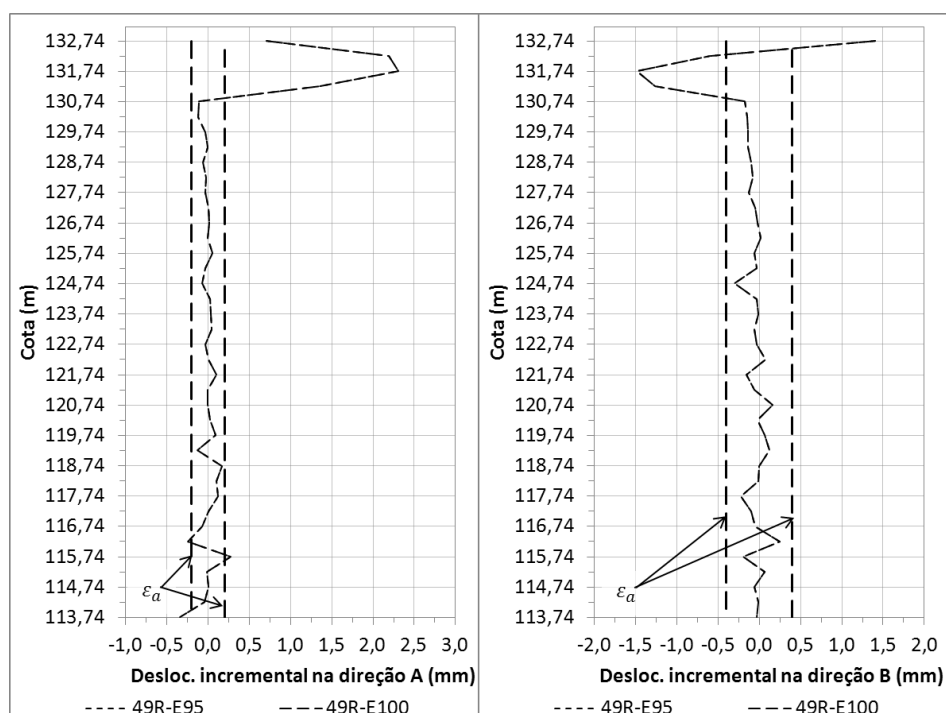


Figura A32 – Tubo I1, campanha 49R. Perfil de deslocamentos incrementais corrigidos nas direções A e B.

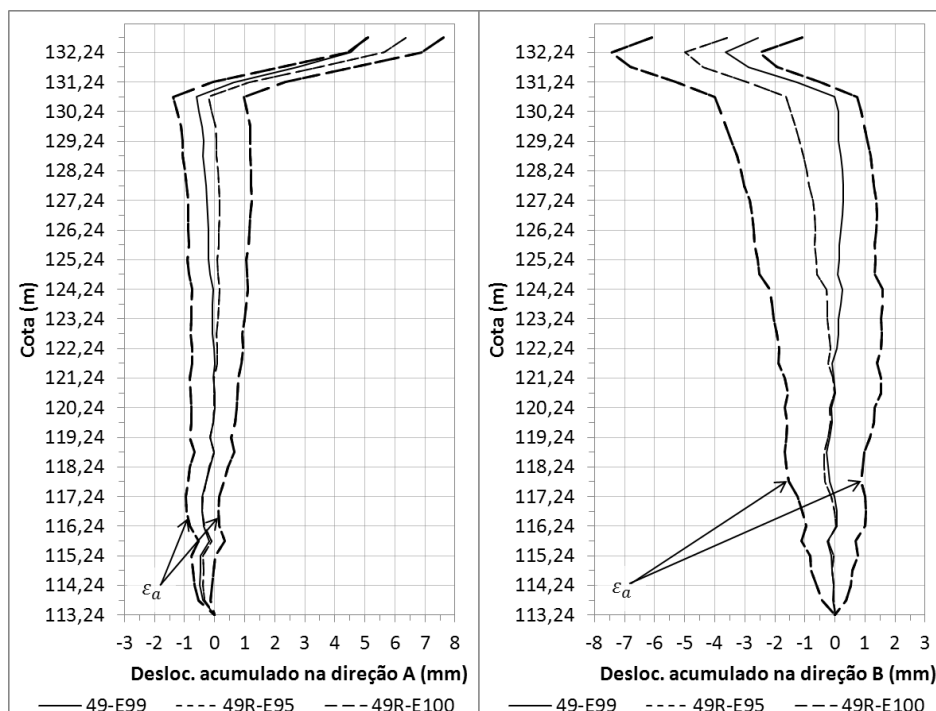


Figura A33 – Tubo I1, campanha 49R. Perfil de deslocamentos acumulados corrigidos nas direções *A* e *B*.

Nas figuras A31 a A33 observa-se que a correção é adequada nas direções *A* e *B*. O sucesso da correção confirma a alteração da média de somas entre as campanhas 49 e 49R (in ex.: cerca de  $-50\text{ un}$  nas direções *A* –  $-88,85\text{ un}$  para  $-141,95\text{ un}$  – e *B* –  $292,28\text{ un}$  para  $247,41\text{ un}$ ).

A correção desta campanha demonstra que a análise de leituras nem sempre é um processo simples e direto. No entanto, fica também demonstrado que as técnicas de análise que se apresentam na secção 6.4.2 permitem a identificação de erro de alteração do desvio mesmo quando o mesmo afeta a totalidade das zonas geotecnicaamente estáveis. A utilização destas técnicas representa duas vantagens relativamente ao método do deslocamento incremental médio:

- os indicadores estatísticos são corrigidos e integrados no histórico de campanhas;
- o perfil de somas de leituras mantém o padrão de variação e permite a deteção de erros sistemáticos adicionais que possam eventualmente existir (in ex.: erros pontuais).

A correção desta campanha demonstra ainda que:

- o uso de valores de desvio na origem de campanhas anteriores é uma prática especulativa cujos resultados devem ser sempre verificados;
- desde que a instalação inclua uma zona que possa ser considerada estável, é possível estimar valores de desvio mais fiáveis do aqueles que provenham doutras campanhas.



## ANEXO VII: CORREÇÃO DE ERROS DE ROTAÇÃO. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA

Este caso de obra reporta-se à observação da estabilidade de uma encosta rochosa a jusante de uma barragem de betão. O sistema inclinométrico habitualmente utilizado nesta obra avariou em finais de 2017, pelo que foi necessário dar continuidade ao programa de observação com outro sistema. Nestas situações, o ideal é utilizar o sistema de múltiplas referências para facilitar a transição. No entanto, o uso de múltiplas referências requer o levantamento da nova referência em data muito próxima à da última campanha executada com o sistema anterior, preferencialmente no próprio dia. Neste caso não foi possível compatibilizar as datas de campanha devido à avaria e a questões de agendamento de outros serviços<sup>1</sup>. Assim, optou-se por corrigir a rotação dos acelerómetros em vez de dar início a um novo período de observação, uma vez que é importante manter a continuidade do histórico de observação.

Na secção 6.4.3 refere-se que a ocorrência de erros de rotação deverá refletir-se da seguinte forma:

- deslocamento acumulado com perfil curvo, quando deveria ser retilíneo<sup>2</sup>;
- desvio acumulado considerável na direção ortogonal;
- perfil de deslocamento acumulado da direção afetada com padrão de forma idêntico ao do perfil de desvio acumulado da direção ortogonal.

Na figura 86 (6.4.3) observa-se que ambas as direções apresentam curvas de deslocamento com curvaturas e magnitudes bastante apreciáveis. Na figura A34 apresentam-se os desvios acumulados das campanhas 23-1DG e 23R-1DG, onde se constata que ambas as direções apresentam desvios consideráveis (in ex.: até 6,5° de inclinação). Comparando-se esta figura com a figura 86 (6.4.3), verifica-se que existe correspondência de curvatura entre direções ortogonais<sup>3</sup>. Desta forma, acrescentando-se o facto de ter ocorrido uma mudança do sistema inclinométrico, conclui-se que o erro observado é um erro de rotação.

Os parâmetros de correção obtêm-se através da equação (101):

$$\begin{cases} \vartheta_A = \sin^{-1} \frac{\Delta D^A}{D^B} \\ \vartheta_B = \sin^{-1} \frac{\Delta D^B}{D^A} \end{cases}$$

Nos quadros A32 e A33 apresentam-se os parâmetros de correção obtidos com base nos valores

<sup>1</sup> Também surgiram algumas preocupações relativamente à qualidade das últimas campanhas executadas com o sistema anterior.

<sup>2</sup> Na verdade, este ponto é discutível e difícil de avaliar, uma vez que a experiência demonstra que a curvatura do perfil depende fortemente da geometria do tubo. Esta questão encontra-se ainda em estudo.

<sup>3</sup> Por exemplo, compare-se a zona superior do desvio acumulado em A com a mesma zona do deslocamento acumulado em B.

incrementais e acumulados, respetivamente. A estimativa obteve-se a partir dos valores médios de  $\vartheta$  entre as cotas 46,41 – 65,41 m. Esta zona foi selecionada por ser considerada estável com base nos deslocamentos obtidos em campanhas anteriores. Verifica-se que os valores obtidos pelos dois métodos são praticamente coincidentes. No entanto, a variabilidade é superior no caso dos valores incrementais. Este facto deve-se à magnitude dos valores interessados (in ex.: o peso relativo duma determinada variância num resultado é tão maior quanto menores forem os valores que o produzem). Por esta razão, recomenda-se o uso de valores acumulados em detrimento de valores incrementais para estimar os ângulos médios.

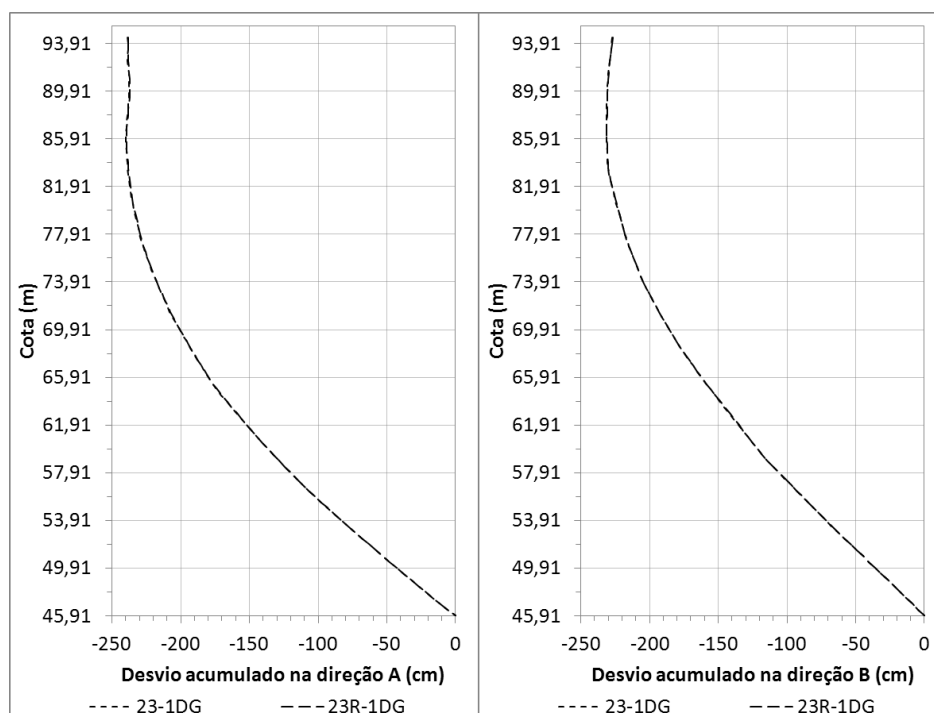


Figura A34 – Tubo R1, campanhas 23-1DG e 23R-1DG. Desvios acumulados nas direções A e B.

Quadro A32-1 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Estimativas dos ângulos de rotação  $\vartheta_A$  e  $\vartheta_B$  a partir de valores incrementais em zona estável – *continua na próxima página.*

Cota (m)	$d^A$ [mm]	$d^B$ [mm]	$\Delta d^A$ [mm]	$\Delta d^B$ [mm]	$\vartheta^A$ [grau]	$\vartheta^B$ [grau]
65,41	-32,12	-33,53	0,48	-0,62	-0,82	1,11
64,91	-35,06	-34,29	0,63	-0,71	-1,05	1,16
64,41	-35,71	-34,46	0,56	-0,73	-0,93	1,17
63,91	-36,32	-34,59	0,63	-0,65	-1,04	1,03
63,41	-36,59	-34,54	0,59	-0,65	-0,98	1,02
62,91	-36,83	-34,75	0,55	-0,61	-0,91	0,95
62,41	-37,30	-34,31	0,52	-0,46	-0,87	0,71
61,91	-37,70	-34,21	0,49	-0,36	-0,82	0,55
61,41	-38,45	-33,85	0,47	-0,35	-0,80	0,52
60,91	-39,25	-33,61	0,50	-0,50	-0,85	0,73
60,41	-39,93	-33,41	0,54	-0,60	-0,93	0,86
59,91	-40,45	-33,41	0,55	-0,60	-0,94	0,85

Quadro A32-2 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Estimativas dos ângulos de rotação  $\vartheta_A$  e  $\vartheta_B$  a partir de valores incrementais em zona estável – *continuação*.

59,41	-41,19	-39,11	0,59	-0,53	-0,86	0,74
58,91	-41,47	-42,48	0,71	-0,61	-0,96	0,84
58,41	-41,90	-42,63	0,59	-0,59	-0,79	0,81
57,91	-42,32	-42,79	0,75	-0,63	-1,00	0,85
57,41	-42,60	-42,61	0,67	-0,61	-0,90	0,82
56,91	-42,87	-42,64	0,72	-0,64	-0,97	0,86
56,41	-46,92	-41,76	0,49	-0,63	-0,67	0,77
55,91	-48,58	-42,48	0,67	-0,71	-0,90	0,84
55,41	-48,38	-42,58	0,69	-0,80	-0,93	0,95
54,91	-48,65	-43,00	0,62	-0,69	-0,83	0,81
54,41	-48,88	-43,18	0,57	-0,84	-0,76	0,98
53,91	-48,73	-43,44	0,58	-0,82	-0,77	0,96
53,41	-50,04	-44,58	0,86	-0,80	-1,11	0,92
52,91	-50,67	-45,86	0,66	-0,86	-0,82	0,97
52,41	-49,59	-45,55	0,70	-0,77	-0,88	0,89
51,91	-50,66	-46,12	0,69	-0,50	-0,86	0,57
51,41	-50,65	-44,81	0,58	-0,67	-0,74	0,76
50,91	-51,26	-44,38	0,60	-0,75	-0,77	0,84
50,41	-51,14	-44,78	0,79	-0,60	-1,01	0,67
49,91	-51,73	-45,75	0,57	-0,65	-0,71	0,72
49,41	-51,77	-45,28	0,66	-0,82	-0,84	0,91
48,91	-51,43	-45,03	0,92	-0,81	-1,17	0,90
48,41	-52,12	-44,58	0,61	-0,84	-0,78	0,92
47,91	-52,04	-44,68	0,83	-0,85	-1,06	0,94
47,41	-55,08	-43,75	0,54	-0,66	-0,71	0,69
46,91	-56,69	-44,09	0,59	-0,81	-0,77	0,82
46,41	-56,95	-44,26	0,80	-0,93	-1,04	0,94
				Média:	-0,89	0,85
				Desv. Pad.:	0,12	0,15

Quadro A33-1 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Estimativas dos ângulos de rotação  $\vartheta_A$  e  $\vartheta_B$  a partir de valores acumulados em zona estável – *continua na próxima página*.

Cota (m)	$D^A$ [mm]	$D^B$ [mm]	$\Delta D^A$ [mm]	$\Delta D^B$ [mm]	$\vartheta^A$ [grau]	$\vartheta^B$ [grau]
65,41	-1770,02	-1591,16	24,56	-26,26	-0,88	0,85
64,91	-1737,90	-1557,63	24,08	-25,64	-0,89	0,85
64,41	-1702,84	-1523,34	23,45	-24,93	-0,88	0,84
63,91	-1667,13	-1488,88	22,89	-24,20	-0,88	0,83
63,41	-1630,81	-1454,29	22,26	-23,55	-0,88	0,83
62,91	-1594,22	-1419,75	21,67	-22,90	-0,87	0,82
62,41	-1557,39	-1385,00	21,12	-22,29	-0,87	0,82
61,91	-1520,09	-1350,69	20,60	-21,83	-0,87	0,82
61,41	-1482,39	-1316,48	20,11	-21,47	-0,88	0,83
60,91	-1443,94	-1282,63	19,64	-21,12	-0,88	0,84
60,41	-1404,69	-1249,02	19,14	-20,62	-0,88	0,84



Quadro A33-2 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Estimativas dos ângulos de rotação  $\vartheta_A$  e  $\vartheta_B$  a partir de valores acumulados em zona estável – *continuação*.

59,91	-1364,76	-1215,61	18,60	-20,02	-0,88	0,84
59,41	-1324,31	-1182,20	18,05	-19,42	-0,87	0,84
58,91	-1283,12	-1143,09	17,46	-18,89	-0,88	0,84
58,41	-1241,65	-1100,61	16,75	-18,28	-0,87	0,84
57,91	-1199,75	-1057,98	16,16	-17,69	-0,88	0,84
57,41	-1157,43	-1015,19	15,41	-17,06	-0,87	0,84
56,91	-1114,83	-972,58	14,74	-16,45	-0,87	0,85
56,41	-1071,96	-929,94	14,02	-15,81	-0,86	0,85
55,91	-1025,04	-888,18	13,53	-15,18	-0,87	0,85
55,41	-976,46	-845,70	12,86	-14,47	-0,87	0,85
54,91	-928,08	-803,12	12,17	-13,67	-0,87	0,84
54,41	-879,43	-760,12	11,55	-12,98	-0,87	0,85
53,91	-830,55	-716,94	10,98	-12,14	-0,88	0,84
53,41	-781,82	-673,50	10,40	-11,32	-0,88	0,83
52,91	-731,78	-628,92	9,54	-10,52	-0,87	0,82
52,41	-681,11	-583,06	8,88	-9,66	-0,87	0,81
51,91	-631,52	-537,51	8,18	-8,89	-0,87	0,81
51,41	-580,86	-491,39	7,49	-8,39	-0,87	0,83
50,91	-530,21	-446,58	6,91	-7,72	-0,89	0,83
50,41	-478,95	-402,20	6,31	-6,97	-0,90	0,83
49,91	-427,81	-357,42	5,52	-6,37	-0,88	0,85
49,41	-376,08	-311,67	4,95	-5,72	-0,91	0,87
48,91	-324,31	-266,39	4,29	-4,90	-0,92	0,87
48,41	-272,88	-221,36	3,37	-4,09	-0,87	0,86
47,91	-220,76	-176,78	2,76	-3,25	-0,89	0,84
47,41	-168,72	-132,10	1,93	-2,40	-0,84	0,82
46,91	-113,64	-88,35	1,39	-1,74	-0,90	0,88
46,41	-56,95	-44,26	0,80	-0,93	-1,04	0,94
				Média:	-0,88	0,84
				Desv. Pad.:	0,03	0,02

Mikkelsen (2003) demonstra o cálculo de  $\vartheta$  a partir dos valores acumulados no topo do tubo. No entanto, sabe-se que a ocorrência de deslocamentos pode afetar a estimativa daqueles parâmetros, mesmo quando a magnitude é pequena relativamente ao erro<sup>1</sup>.

Nas figuras A35 e A36 apresentam-se os valores de  $\vartheta$  calculados nos quadros A32 e A33, respetivamente. Nestas figuras confirma-se que os valores acumulados produzem estimativas mais estáveis (in ex.: com menor variabilidade). No entanto:

- ambos os métodos são afetados pela ocorrência de deslocamentos, embora essa influência seja bastante mais expressiva nos resultados baseados em valores incrementais;

<sup>1</sup> Naturalmente, a influência dos deslocamentos na estimativa de  $\vartheta$  será maior para maiores deslocamentos e em inclinações mais acentuadas.

- embora os resultados acumulados apresentem menor variabilidade, a estabilização só ocorre após  $n$  secções de tubo a partir da base<sup>1</sup>. Por esta razão, resultados incrementais poderão ser preferíveis quando a zona estável é muito curta.

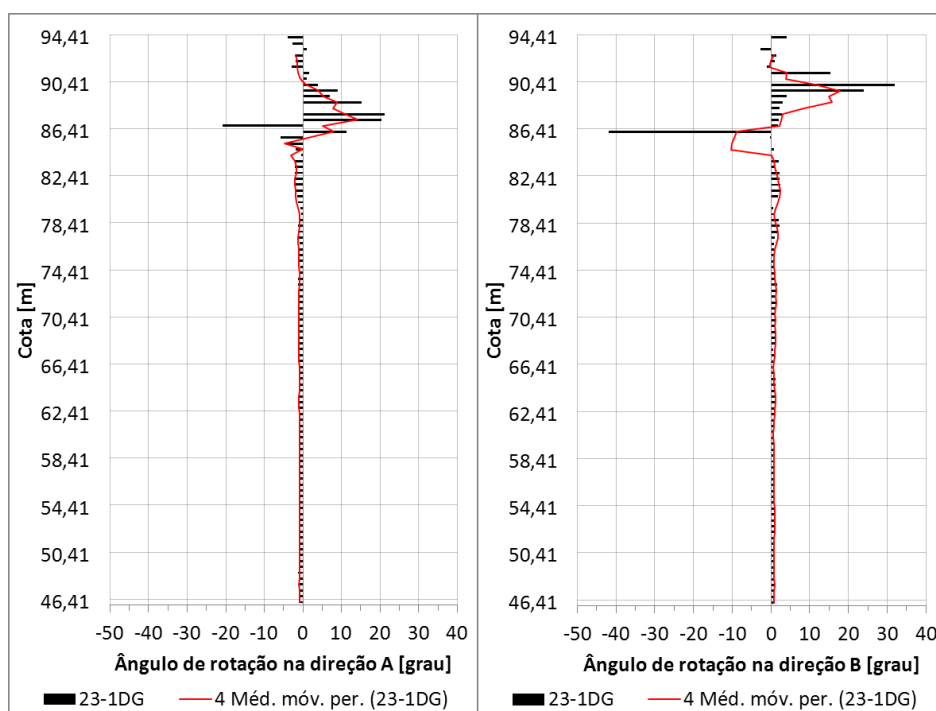


Figura A35 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Ângulos de rotação nas direções *A* e *B*, obtidos a partir dos valores incrementais de cada secção de tubo.

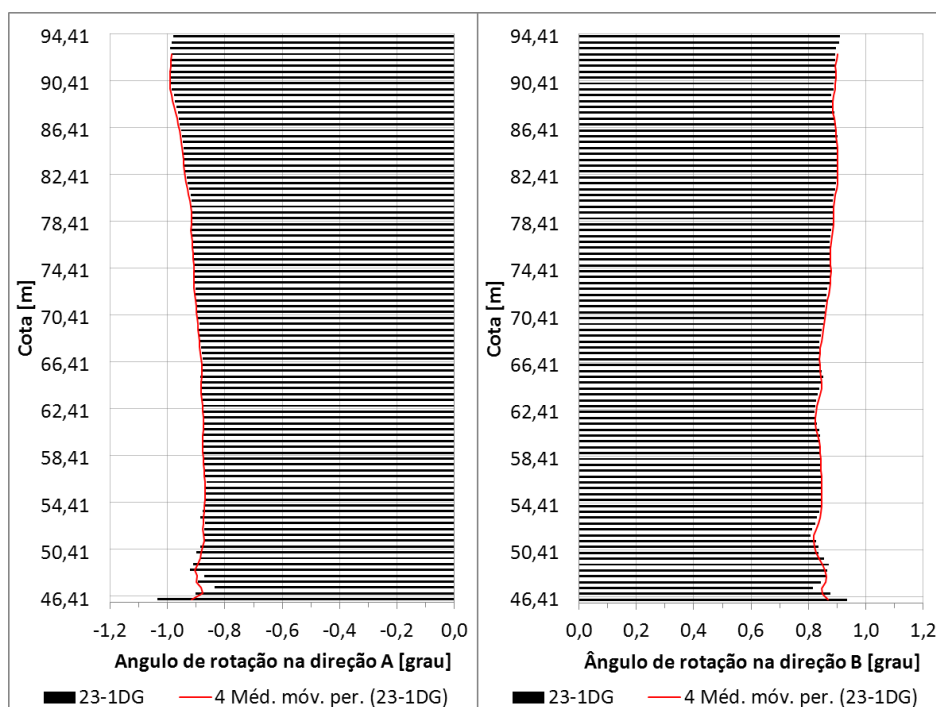


Figura A36 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Ângulos de rotação nas direções *A* e *B*, obtidos a partir dos valores acumulados de cada secção de tubo.

<sup>1</sup> Este facto verifica-se noutras obras com situações semelhantes. Logo, não se deve a uma característica própria desta instalação.

Outra forma de estimar o valor de  $\vartheta$  é calculando a tangente da correlação de  $\Delta D$  em função de  $D$ . De facto, uma análise mais aprofundada da figura 85 (6.4.3) sugere que a tangente será matematicamente mais correta que o seno para a estimativa de  $\vartheta$ . Esta questão encontra-se ainda em estudo.

No quadro seguinte apresentam-se os resultados obtidos pelos dois métodos (in ex.: seno e tangente). Neste quadro observa-se que o ângulo estimado pela função tangente só tem significado quando se baseia em valores acumulados. Pois, não existe correlação significativa entre valores incrementais de deslocamento e de desvio. Todos os outros ângulos são praticamente idênticos.

Quadro A34 – Tubo R1, campanha 23-1DG. Comparação entre as estimativas produzidas pelas funções seno e tangente nas direções A e B e a partir de valores incrementais e acumulados.

	Direção A [grau]				Direção B [grau]			
	$\tan^{-1} \Delta d/d$	$\sin^{-1} \Delta d/d$	$\tan^{-1} \Delta D/D$	$\sin^{-1} \Delta D/D$	$\tan^{-1} \Delta d/d$	$\sin^{-1} \Delta d/d$	$\tan^{-1} \Delta D/D$	$\sin^{-1} \Delta D/D$
$\vartheta$	-0,78	-0,89	-0,88	-0,88	0,70	0,85	0,83	0,84
$R^2$	0,35	-	1,00	-	0,38	-	1,00	-
$\sigma$	-	0,12	-	0,03	-	0,15	-	0,02

Note-se que os ângulos de rotação dependem apenas dos sistemas inclinométricos. Logo, estes valores devem ser fixos entre dois sistemas de medição, independentemente da instalação inclinométrica. Por esta razão, é comum proceder-se à estimativa de um valor médio global. Este valor pode determinar-se a partir de medições laboratoriais, desde que o aparato de medição tenha amplitude suficiente para cobrir a gama de inclinações que ocorrem em obra. Caso contrário devem ser utilizados dados de obra.

Neste caso em particular, para demonstração, os ângulos apresentados em 6.4.3 correspondem à média entre as campanhas 23-1DG ( $\vartheta^A = -0,88^\circ$ ;  $\vartheta^B = 0,84^\circ$ ) e 23R-1DG ( $\vartheta^A = -0,92^\circ$ ;  $\vartheta^B = 0,80^\circ$ ). Na prática, existindo várias instalações envolvidas no processo, é frequente haver necessidade de ponderar a média global. No Anexo IX sugere-se um critério de ponderação que tem sido aplicado com sucesso.

Obtidos os ângulos de rotação, a correção baseia-se na equação (105)<sup>1</sup> (6.4.3):

$$\begin{cases} d_{c,i}^A = d_i^A - d_i^B \sin \vartheta_A \\ d_{c,i}^B = d_i^B - d_i^A \sin \vartheta_B \end{cases} \vee \begin{cases} D_{c,i}^A = D_i^A - D_i^B \sin \vartheta_A \\ D_{c,i}^B = D_i^B - D_i^A \sin \vartheta_B \end{cases}$$

Mikkelsen (2003) aplica esta expressão somando os termos que produzem a correção da direção A, enquanto o programa comercial DigiPro2 (DGSI, 2014c) aplica esta expressão somando os termos que produzem a correção da direção B. Na figura 85 (6.4.3) demonstra-se que ambas as con-

<sup>1</sup> Ou aplicando a função tangente em detrimento do seno na mesma expressão.

dições são inválidas e duplicam o erro na direção onde se aplica a soma, uma vez que o deslocamento produzido pelo erro de rotação é sempre simétrico entre as direções  $A$  e  $B$ . De facto, a magnitude do erro corresponde a:

$$d_i \sin \vartheta$$

, pelo que facilmente se depreende que este valor deve ser subtraído em cada direção a corrigir.



## ANEXO VIII: CORREÇÃO DE ERROS DE PROFUNDIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA

Este caso de obra refere-se a uma estrutura que se encontra no topo duma encosta com elevado grau de erosão. A erosão da encosta tem vindo a provocar alguns danos na estrutura que suporta, razão pela qual decorrem atualmente operações de estabilização, proteção e reforço da encosta.

A litografia local compreende essencialmente a intercalação de estratos de origem sedimentar sobrepostos por depósitos de aterro areno-silto-argilosos com fragmentos líticos. Os estratos sedimentares são, na sua generalidade, de resistência boa a razoável e compreendem arenitos, calcarenitos e composições margosas compactas. Os aterros sobrejacentes encontram-se muito descomprimidos e têm espessuras que podem variar entre 0,5 – 6 m.

O programa de observação geotécnica compreende 7 tubos inclinométricos que são observados por duas entidades. Com o objetivo de conciliar as medições de ambas as entidades no mesmo histórico, tentou-se proceder à correção do diferencial de rotação entre os acelerómetros dos dois sistemas. Contudo, esta operação não foi possível devido à magnitude das discrepâncias entre as medições das duas entidades. A título de exemplo, nas figuras A37 e A38 apresentam-se os deslocamentos acumulados da campanha de referência duma entidade relativamente à campanha de referência doutra entidade em duas instalações inclinométricas.

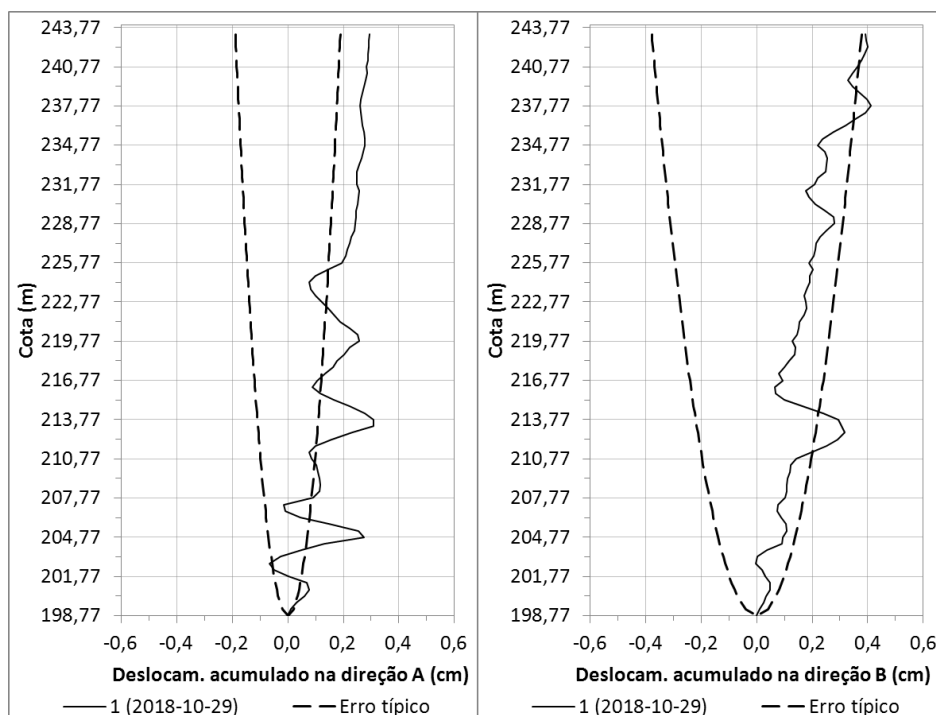


Figura A37 – Tubo I1A. Deslocamentos acumulados entre campanhas de referência de duas entidades.

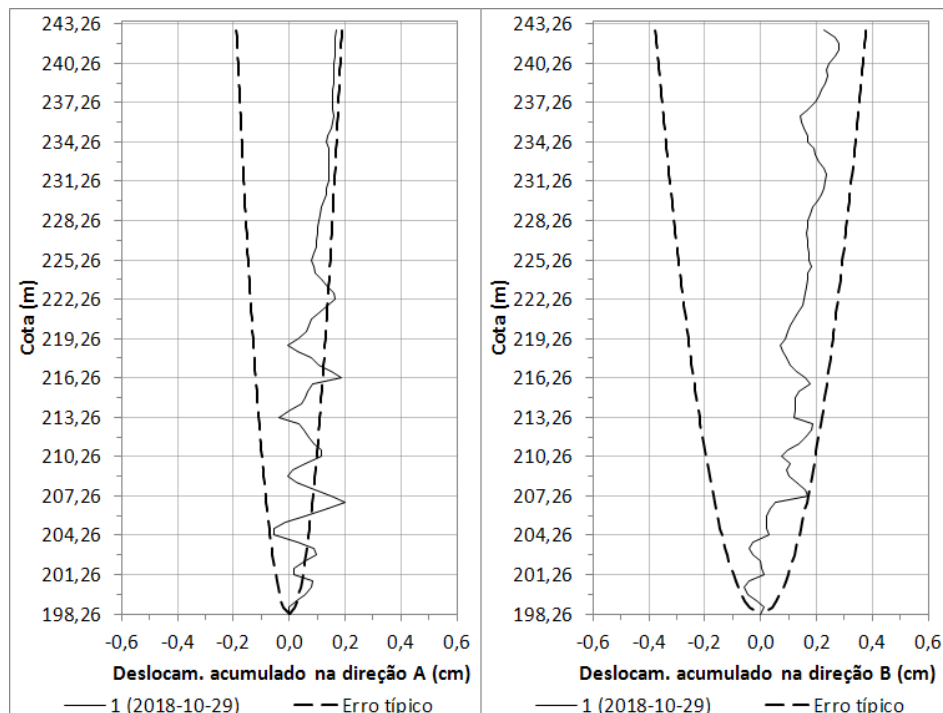


Figura A38 – Tubo I4A. Deslocamentos acumulados entre campanhas de referência de duas entidades.

Os perfis das figuras A37 e A38 encontram-se corrigidos relativamente à rotação dos acelerómetros, cujos ângulos das direções *A* e *B* foram estimados por uma média global ponderada. Nestas figuras verifica-se que:

- os ângulos de rotação estimados não se adequam a todas as instalações, chegando mesmo a produzir resultados fora dos limites de confiança estabelecidos;
- verificam-se várias distorções de linearidade nas curvas, o que não é expectável em deslocamentos entre campanhas executadas no mesmo dia.

Na secção 6.4.4 refere-se que os erros de profundidade se identificam pela semelhança entre os padrões de forma dos perfis de deslocamentos acumulados da campanha afetada e de desvios incrementais da respetiva referência. Nas figuras A39 e A40 apresentam-se os desvios incrementais das campanhas de referência das figuras A37 e A38, respetivamente. Da comparação entre os perfis de deslocamento e de desvio observam-se semelhanças de forma, embora pouco consistentes ao longo da profundidade.

Para confirmar a presença de erros de profundidade analisaram-se também os deslocamentos incrementais em profundidade (figuras A41 e A42). Com algumas exceções, nestes perfis constatou-se o aumento dos deslocamentos incrementais em profundidade. Com base nestas observações, concluiu-se que os dados inclinométricos incluem erros de profundidade que são variáveis ao longo da profundidade.

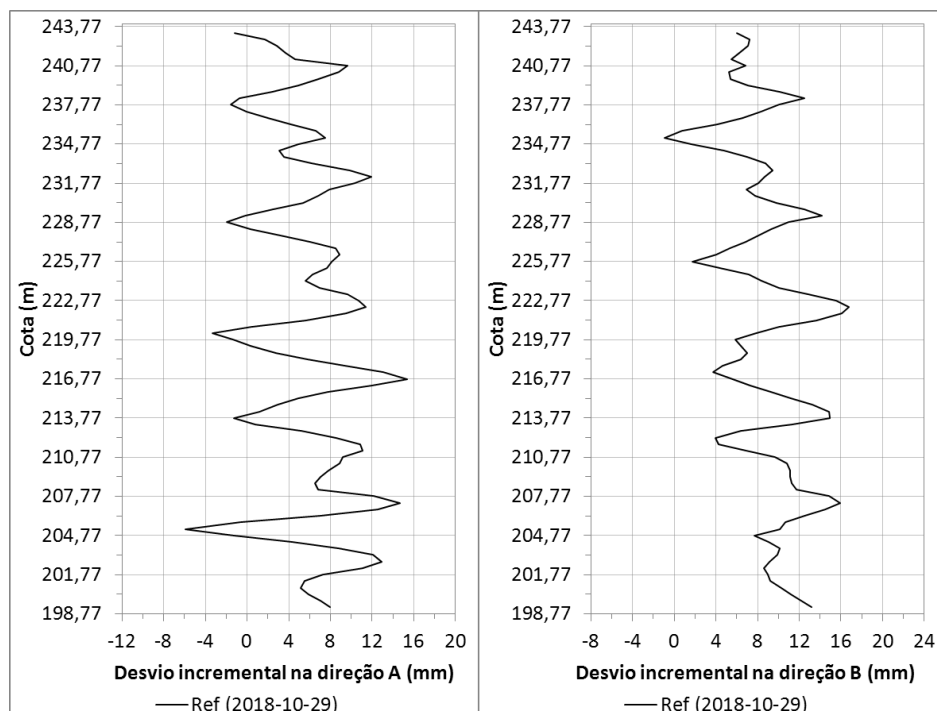


Figura A39 – Tubo I1A. Desvios incrementais da campanha de referência da figura A37.

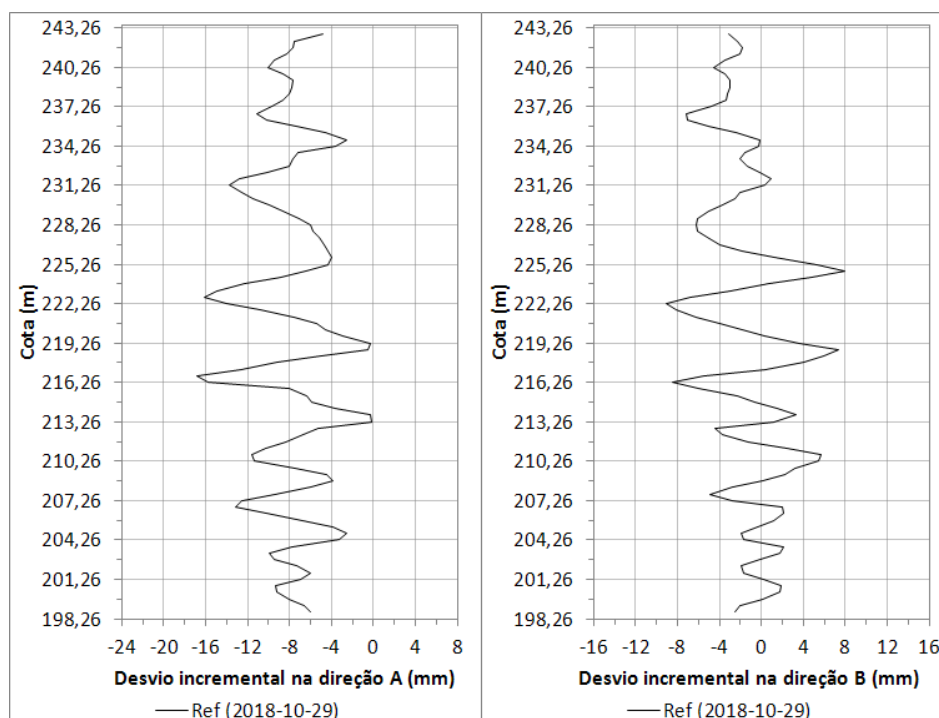


Figura A40 – Tubo I4A. Desvios incrementais da campanha de referência da figura A38.



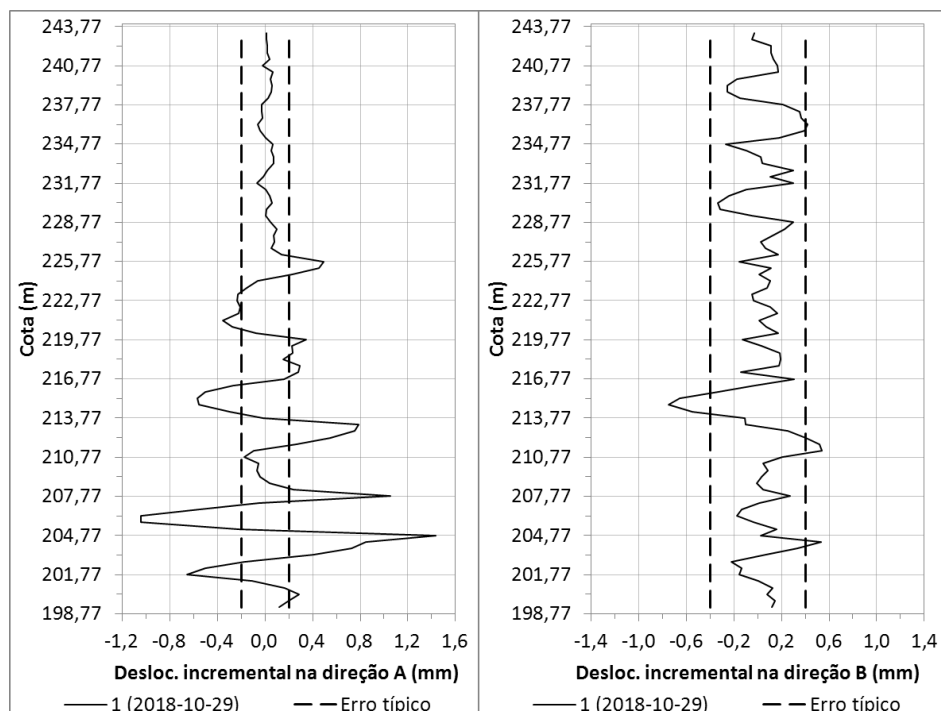


Figura A41 – Tubo I1A. Deslocamentos incrementais entre campanhas de referência de duas entidades.

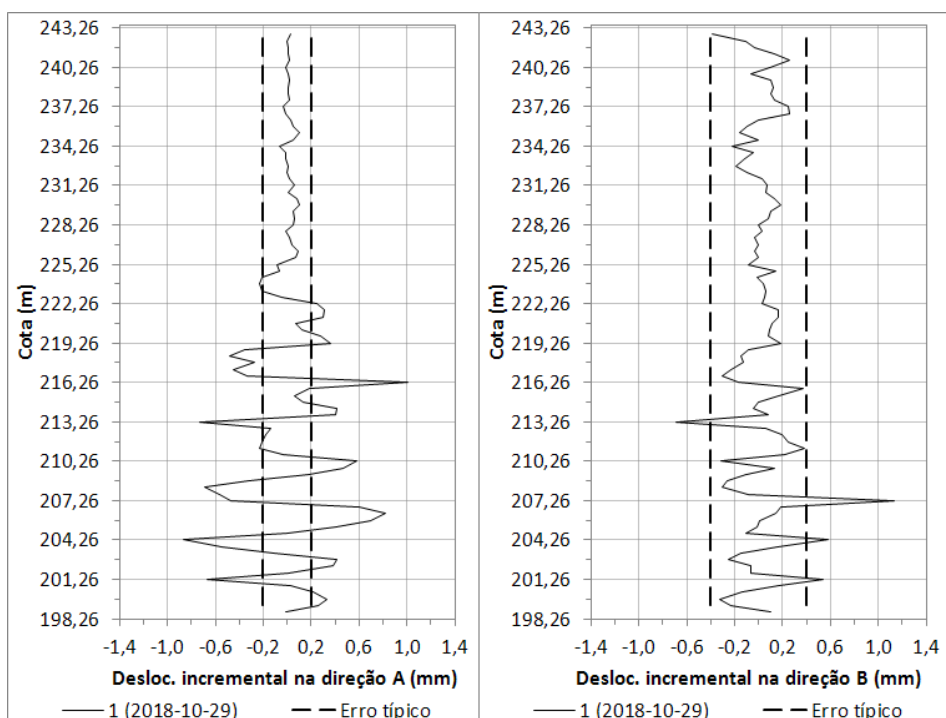


Figura A42 – Tubo I4A. Deslocamentos incrementais entre campanhas de referência de duas entidades.

Mediante a impossibilidade de estimar um erro de profundidade constante, procedeu-se à estimativa dos erros de profundidade da seguinte forma:

1. Ambos os cabos foram estendidos paralelamente ao longo de 50 m.
2. As marcas iniciais foram alinhadas.
3. Foi medida a distância entre marcas a cada 5 m de comprimento.

4. Foi executado um ensaio de extensibilidade em ambos os cabos, a 50 m de comprimento, uma vez que a secção transversal e os materiais de construção dos cabos são diferentes.
5. Foi determinada uma função de ajuste às diferenças entre marcas obtidas, considerando-se também os resultados do ensaio de extensibilidade.
6. Com base na equação (108) (6.4.4) e na função determinada no ponto 5, corrigiram-se os erros de profundidade nos dados de leitura.
7. Determinaram-se novos ângulos de rotação partir dos dados corrigidos.

A execução dos procedimentos descritos contou a colaboração dos Bolseiros Luís Coimbra e Cláudia Henriques, dos Técnicos Superiores António Coelho e José Alvarez, e de dois elementos da equipa de trabalho doutra entidade.

No quadro seguinte apresentam-se as distâncias entre marcas registadas a cada 5 m.

Quadro A35 – Distâncias entre as marcas dos dois cabos registadas ao longo de 50 m com passo de 5 m.

Marca (m):	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Distância (cm):	0,3	0,9	1,8	3,2	4,9	5,8	7,2	8,5	9,4	10,8

Para a realização do ensaio de extensibilidade procedeu-se à determinação da carga suspensa pelo cabo à profundidade de 50 m (quadro A36). Seguidamente fixou-se cada cabo a um dinamómetro, aplicando-se posteriormente tração até à carga respetiva. Sob tensão, a primeira marca de cada cabo foi alinhada com um ponto de referência e a posição da marca de 50 m foi registada. O diferencial de extensibilidade entre os cabos equivale à diferença entre os registos obtidos sob tensão e o valor constante no quadro A35 (in ex.: 10,8 cm). Tendo-se obtido uma diferença entre marcas de 11,3 cm no ensaio de tração e tendo-se considerando que o diferencial de extensibilidade é linear ao longo do comprimento do cabo, concluiu-se que esse diferencial é de  $5\text{ mm}/50\text{ m} = 4\text{ mm}/30\text{ m}$ . Este valor foi considerado satisfatório porque o manual do sistema com o cabo mais extensível refere uma extensibilidade de  $3\text{ mm}/30\text{ m}$ .

Quadro A36 – Carga estimada para o ensaio de extensibilidade.

Sistema:	Entidade 1	Entidade 2
Massa da sonda (kg):	1,4	1,4
Massa do cabo (kg/50 m):	6	2,3
Carga total a 50 m de profundidade (kg):	7,4	3,7

Obtido o diferencial de extensibilidade, as diferenças entre marcas do quadro A35 foram atualizadas (quadro A37) e determinou-se uma função de ajuste adequada. Sabendo-se que o erro admissível de posicionamento se deve situar no intervalo  $\pm 3\text{ mm}$ , procurou-se uma função com as seguintes características:

- origem em (0; 0);

- menor complexidade possível;
- média e mediana dos resíduos próximas de zero;
- valor absoluto de resíduo máximo inferior a 3 mm.

Quadro A37 – Diferenças entre marcas registradas com acréscimo do diferencial de extensibilidade.

Marca (m):	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Distância (mm):	3,5	10,0	19,5	34,0	51,5	61,0	75,5	89,0	98,5	113,0

Procedeu-se ao ajuste das diferenças entre marcas através de funções de 2º e de 3º grau. No entanto, o melhor resultado obteve-se com uma função parabólica até à marca de 25 m e outra função linear a partir desse ponto. Esta solução resulta numa média de resíduos de 0,08 mm, mediana de -0,16 mm e valor absoluto máximo de 1,84 mm. Na figura seguinte apresentam-se as diferenças entre marcas juntamente com as funções de ajuste determinadas.

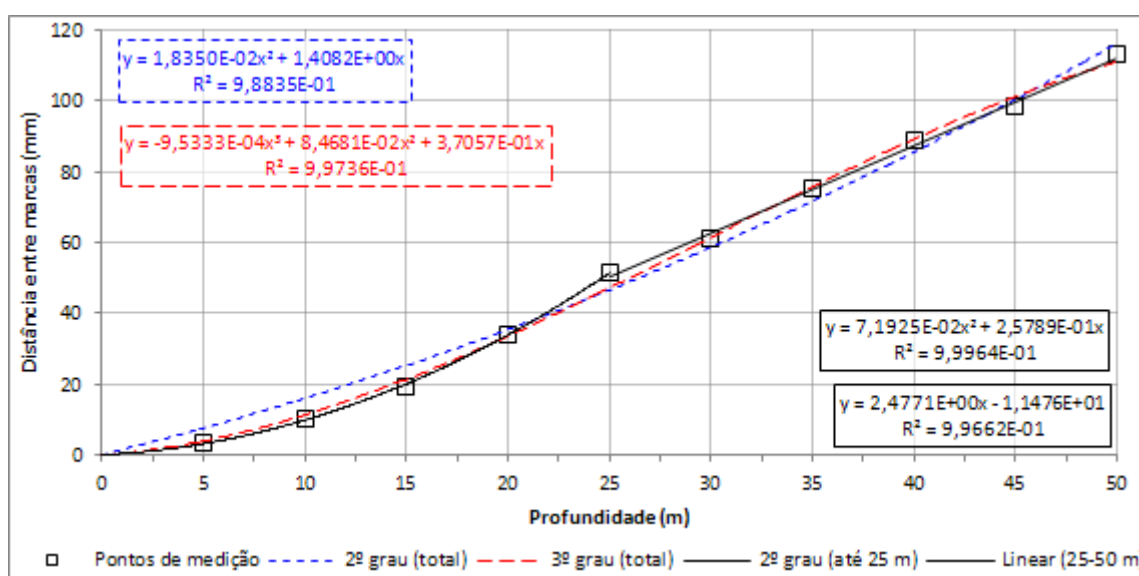


Figura A43 – Diferenças entre marcas e funções de ajuste definidas.

Importa notar que o perfil de diferenças entre marcas obtido indicia que um dos cabos tenha maior utilização até à marca de 25 m, tendo desenvolvido maior fadiga até essa profundidade, designadamente no intervalo 15 – 25 m. De facto, uma das entidades confirma que a maioria das instalações onde o sistema respetivo opera tem profundidades dentro daquele intervalo.

De acordo com a equação (108) (6.4.4) e com as funções determinadas, os dados do sistema cujo cabo apresenta maior comprimento foram corrigidos da seguinte forma:

$$\begin{cases} l_{c,i} = l_i + (p^2 7,1925E^{-2} + p 2,5789E^{-1}) (l_{i+1} - l_i) / L ; p \leq 25 \text{ m} \\ l_{c,i} = l_i + (p 2,4771 - 1,1476E^{+1}) (l_{i+1} - l_i) / L ; p > 25 \text{ m} \end{cases}$$

, sendo  $p$  a profundidade de medição. A secção  $n$  (in ex.: no topo do tubo) foi corrigida por extrapolação:

$$l_{c,n} = l_{n-1} + \left( L - (p^2 7,1925 E^{-2} + p 2,5789 E^{-1}) \right) (l_n - l_{n-1}) / L$$

Seguidamente procedeu-se à definição de novos ângulos de rotação globais por média ponderada. Os ângulos de determinados foram  $1,10^\circ$  e  $-1,19^\circ$  nas direções *A* e *B*.

Nas figuras A44 e A45 apresentam-se os perfis de deslocamento acumulado das figuras A37 e A38, juntamente com as curvas homólogas após correção dos erros de profundidade e de rotação. Verifica-se que houve uma redução geral da magnitude das perturbações de linearidade das curvas. Embora se tenham obtido resultados mistos relativamente ao sucesso das correções de rotação, foi possível manter as curvas de deslocamento dentro dos limites de confiança definidos na maioria das instalações. Com o aumento dos deslocamentos (in ex.: alargamento da escala), as divergências remanescentes perderam gradualmente a sua significância.

Fica demonstrado que a correção de erros de profundidade é de aplicação simples, desde que se conheçam os valores de desfaseamento. Caso contrário o processo é complexo, moroso e apresenta pouca probabilidade de sucesso. Fica ainda demonstrado que pequenos erros de medição podem incorrer em alterações significativas dos perfis de deslocamento, sendo a curvatura do tubo um fator de agravamento. Neste caso particular as correções não atingiram os objetivos esperados. Por um lado, pensa-se que a medição das diferenças com passo de 5 m não terá sido suficiente; por outro lado, a qualidade das instalações inclinométricas não será a melhor, o que também não contribuiu para a concretização dos objetivos.

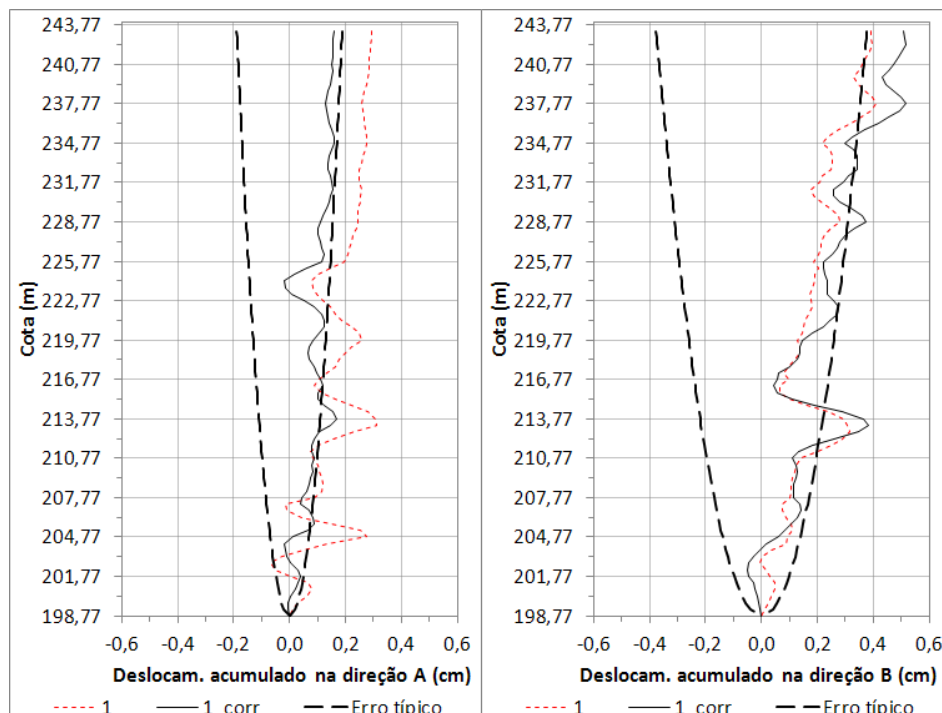


Figura A44 – Tubo I1A. Comparação entre perfis de deslocamentos com e sem correção dos erros de profundidade.

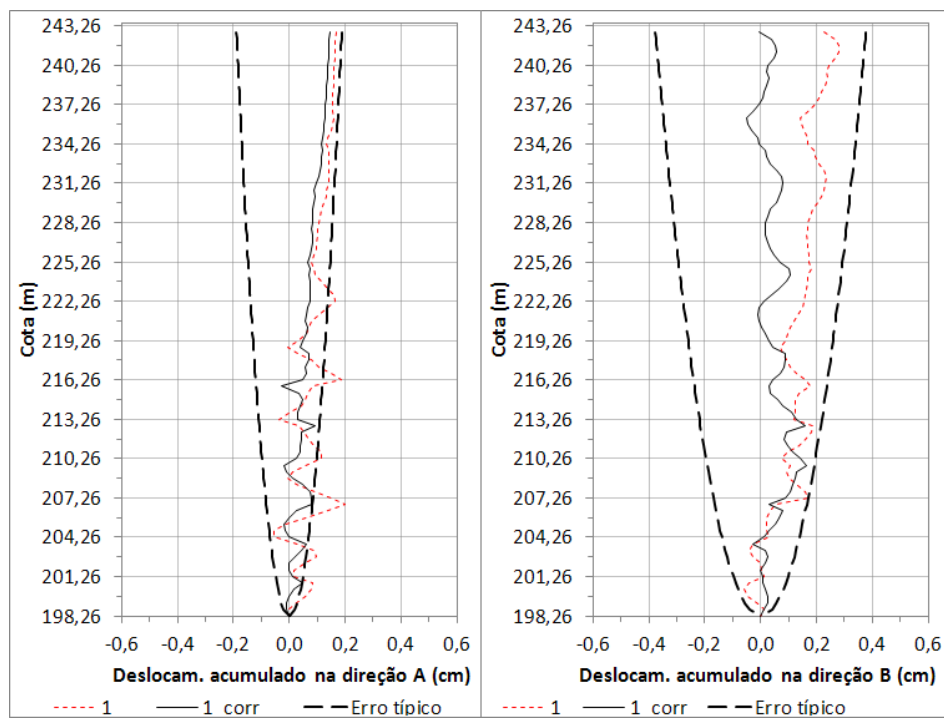


Figura A45 – Tubo I4A. Comparação entre perfis de deslocamentos com e sem correção dos erros de profundidade.

## ANEXO IX: CORREÇÃO DE ERROS DE SENSIBILIDADE. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASO DE OBRA

Este caso de obra refere-se à ocorrência descrita no Anexo IV. Neste anexo descreve-se o processo de identificação e de correção do erro de sensibilidade a partir dos dados de obra.

Tal como descrito no Anexo IV, a unidade de aquisição do sistema inclinométrico utilizado nesta obra sofreu uma avaria. Após reparação da mesma verificou-se a impossibilidade de leitura do acelerómetro da direção *B* e a incongruência total dos dados recolhidos na direção *A*.

Mikkelsen (2003) refere que este tipo de erro se deve a alterações de sensibilidade no amplificador operacional da sonda. No entanto, a descrição que faz do problema, e que se constata na prática, é de um erro de ganho. De facto, os dois termos são frequentemente confundidos no vocabulário associado à eletrotecnia. Contudo, em termos metrológicos estes termos têm significados distintos:

- Sensibilidade: menor variação duma grandeza física mensurável por um sensor.
- Ganho: relação entre as magnitudes de variação duma grandeza física e da resposta sensorial respetiva.

Por uma questão de coerência opta-se pela manutenção do termo “sensibilidade instrumental” para definir este tipo de erro. Contudo, convém entender que este é efetivamente um problema de ganho do sinal. Ou seja, “erros de sensibilidade” resultam na alteração proporcional dos valores medidos.

De acordo com esta definição, um erro de sensibilidade resulta necessariamente na equivalência proporcional entre os perfis de desvios e de deslocamentos da campanha afetada, já que os desvios são medidos com uma resposta sensorial proporcional à da campanha de referência e essa proporção traduz-se em deslocamento.

Nas figuras A46 e A47 apresentam-se, respetivamente, os perfis de desvio e de deslocamento obtidos na direção *A* duma instalação inclinométrica. Nestas figuras verifica-se que existe correspondência proporcional entre os dois perfis, sendo esta observação comum a todas as instalações desta obra. Com base nestes resultados concluiu-se que as incongruências se deveriam a um erro de sensibilidade.

O método sugerido por Coimbra (2011) assenta no princípio da proporcionalidade entre desvios e deslocamentos para determinação de um coeficiente de deriva ((110), 6.4.5):

$$\bar{d}_s = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta D_i / D_i)}{n}$$

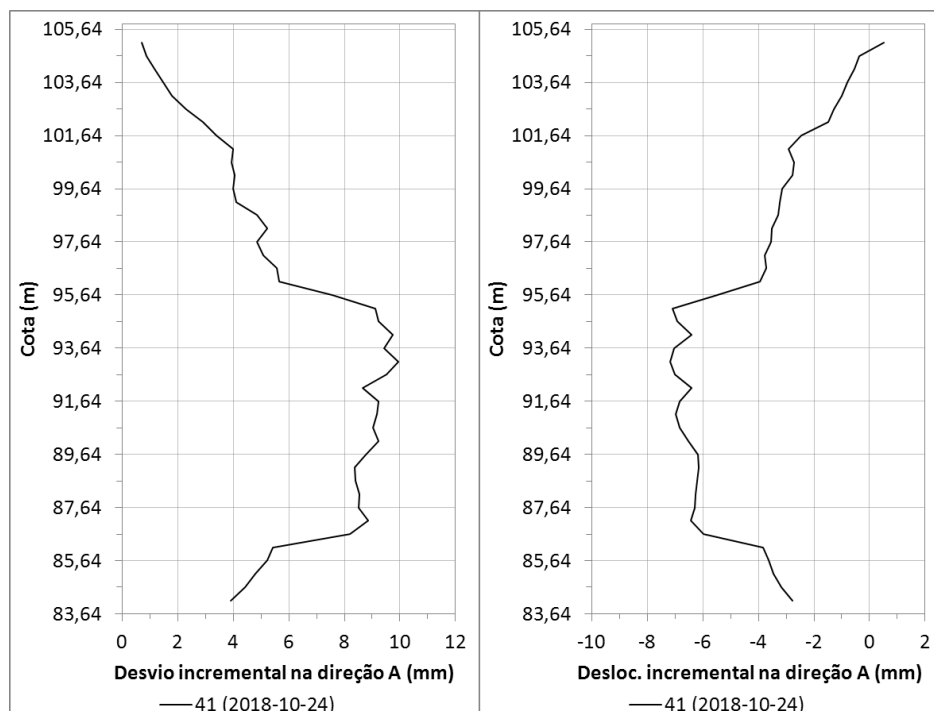


Figura A46 – Tubo F1, campanha 41. Desvio e deslocamentos incrementais.

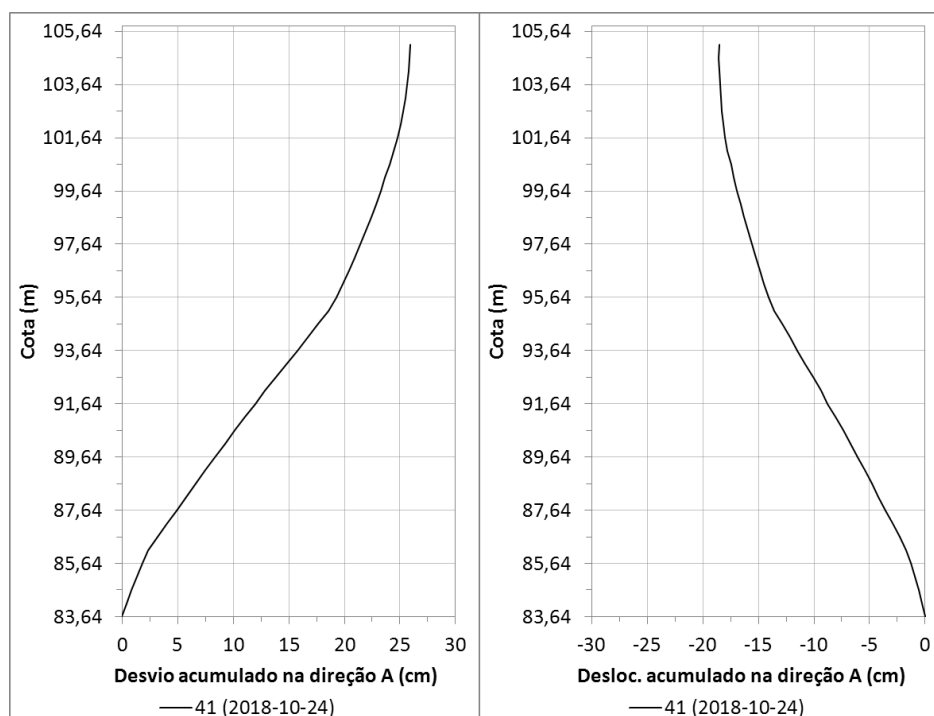


Figura A47 – Tubo F1, campanha 41. Desvios e deslocamentos acumulados.

Para evitar a influência que a ocorrência de deslocamentos poderá ter na estimativa de  $\bar{d}_s$ , é aconselhável a definição de uma zona geotecnicaamente estável para o efeito. Esta zona foi definida em cada instalação com base nos deslocamentos obtidos em campanhas anteriores.

No quadro A38 apresentam-se os coeficientes obtidos nas 4 instalações desta obra. Excetuando o

tubo F2<sup>1</sup>, verifica-se que os valores obtidos são muito consistentes em, e entre, todas as instalações, mesmo comparando-se estimativas obtidas de valores incrementais e acumulados<sup>2</sup>.

Quadro A38 – Coeficientes de deriva da sensibilidade estimados nas instalações observadas.

Instalação	Número de secções	Deslocamentos/desvios incrementais			Deslocamentos/desvios acumulados		
		$ds$	$\sigma$	$CV(\%)$	$ds$	$\sigma$	$CV(\%)$
F1	12	-0,7212	0,01	2,02	-0,7168	0,01	0,93
F2	39	-1,3016	1,86	143,05	-0,8933	0,09	10,19
F3	19	-0,7331	0,01	1,71	-0,7331	0,01	0,97
F4	42	-0,7328	0,01	1,78	-0,7321	0,00	0,34

Tal como acontece com os erros de rotação (6.4.3; Anexo VII), os erros de sensibilidade são uma característica instrumental que depende exclusivamente do sistema de medição. Logo, a correção deve fazer-se ao nível global (in ex.: o mesmo parâmetro de correção deve aplicar-se a todas as instalações). Neste sentido, o valor médio global deve basear-se na maior quantidade de dados possível. No caso que aqui se apresenta dispõe-se de 4 campanhas executadas na direção A.

Uma forma simples de se proceder à definição de um parâmetro global é calculando o valor médio de todos os parâmetros determinados em cada conjunto de dados (in ex.: cada campanha). Esta prática produz resultados satisfatórios mediante duas condições:

- a quantidade de dados é muito elevada<sup>3</sup>;
- a variabilidade dos parâmetros estimados é muito baixa.

Excluindo-se os resultados obtidos no tubo F2, confirma-se a validade da segunda condição (quadro A38). No entanto, é muito frequente ser necessário ponderar a média para se conseguir definir um valor global mais adequado à maioria das estimativas individualmente produzidas. O critério seguinte tem sido aplicado com bastante sucesso:

$$\mu = \frac{\sum x_i N_i / CV_i}{\sum N_i / CV_i}$$

, onde  $\mu$  é o valor médio global a produzir (in ex.:  $\bar{d}_s$  global),  $x_i$  representa cada parâmetro de correção individualmente determinado (in ex.:  $\bar{d}_s$ ),  $N_i$  é o número de secções de tubo que contribuem para a determinação de  $x_i$  e  $CV_i$  é o coeficiente de variação do conjunto de dados que contribuem para a determinação de  $x_i$ .

Este critério tem por objetivo dar maior relevo a parâmetros cuja variabilidade é menor e cujo

<sup>1</sup> Este tubo tem inclinações praticamente verticais na direção A, o que dificulta a determinação de  $\bar{d}_s$ .

<sup>2</sup> Convém não esquecer que neste caso de obra o erro é muito elevado, o que facilita a estimativa de  $\bar{d}_s$ . Erros mais pequenos resultam em maior variabilidade de  $\bar{d}_s$ , sendo nesse caso preferível beneficiar da estabilidade dos valores acumulados.

<sup>3</sup> Ou seja, número de campanhas e número de secções que compõem as zonas consideradas geotecnicaamente estáveis.



conjunto de dados é maior. O método tem sido aplicado com sucesso na definição de parâmetros para correção de erros de rotação e de sensibilidade. Outros critérios a considerar consistem na triagem dos valores de  $x_i$  através de outras ferramentas estatísticas. Esta é uma questão que ainda se encontra em estudo.

No quadro seguinte resume-se o cálculo do parâmetro  $\bar{d}_s$  global com e sem ponderação. Deste quadro conclui-se:

- o critério de ponderação é bem sucedido<sup>1</sup>;
- confirma-se a estabilidade proporcionada pelos valores acumulados<sup>2</sup>.

Quadro A39 – Cálculo de parâmetros médios globais ponderados e não ponderados, com base em valores incrementais e acumulados.

Instalação	Deslocamentos/desvios incrementais			Deslocamentos/desvios acumulados		
	$ds$	$N/CV[\%]$	$dsN/CV[\%]$	$ds$	$N/CV[\%]$	$dsN/CV[\%]$
F1	-0,7212	5,94	-4,29	-0,7168	12,94	-9,27
F2	-1,3016	0,27	-0,35	-0,8933	3,83	-3,42
F3	-0,7331	11,11	-8,14	-0,7331	19,57	-14,35
F4	-0,7328	23,64	-17,32	-0,7321	123,97	-90,76
Média	-0,8721		-0,7349	-0,7688		-0,7348
	Sem ponderação	Com ponderação		Sem ponderação	Com ponderação	

Obtido o valor global de  $\bar{d}_s$ , a correção de dados faz-se por aplicação da equação (112) (6.4.5):

$$l_{c,i} = l_i(1 - \bar{d}_s)$$

No quadro A40 apresentam-se os dados inclinométricos com e sem correção da campanha 41 do tubo F1 na direção A. Na figura A48 apresentam-se os perfis de deslocamento acumulado das campanhas 40 e 41 na direção A dos tubos F1 e F2, incluindo-se as curvas corrigidas com os valores globais de  $\bar{d}_s$  com e sem ponderação.

Na figura A48 verifica-se que:

- o valor médio ponderado produz resultados muito satisfatórios, mesmo na instalação F2, onde o parâmetro  $\bar{d}_s$  obtido diverge dos restantes;
- o valor médio não ponderado produz resultados que divergem significativamente da curva da campanha 40 nas duas instalações analisadas;
- variações pequenas de  $\bar{d}_s$ , neste caso cerca de 4%, podem produzir resultados muito distintos, pelo que é importante que se produza uma estimativa com um elevado grau de fiabilidade (in ex.: com a menor variabilidade possível).

<sup>1</sup> Ou seja, a discrepância entre médias ponderadas é inferior à discrepância entre médias não ponderadas.

<sup>2</sup> Ou seja, a disparidade entre médias de valores acumulados é inferior à disparidade entre médias de valores incrementais.

Quadro A40-1 – Tubo F1, campanha 41 (2018-10-24). Dados de leitura com e sem correção de sensibilidade – continua na próxima página.

Cota (m)	Profundidade (m)	Eixo A (não corrigido)			Eixo A (ds = -0,7348)		
		0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
105,14	0,70	-46	-188	-234	-80	-326	-406
104,64	1,20	-33	-207	-240	-57	-359	-416
104,14	1,70	0	-234	-234	0	-406	-406
103,64	2,20	33	-266	-233	57	-461	-404
103,14	2,70	64	-297	-233	111	-515	-404
102,64	3,20	113	-348	-235	196	-604	-408
102,14	3,70	173	-407	-234	300	-706	-406
101,64	4,20	222	-455	-233	385	-789	-404
101,14	4,70	283	-515	-232	491	-893	-402
100,64	5,20	277	-510	-233	481	-885	-404
100,14	5,70	290	-523	-233	503	-907	-404
99,64	6,20	284	-517	-233	493	-897	-404
99,14	6,70	293	-529	-236	508	-918	-409
98,64	7,20	370	-603	-233	642	-1046	-404
98,14	7,70	405	-640	-235	703	-1110	-408
97,64	8,20	369	-601	-232	640	-1043	-402
97,14	8,70	390	-626	-236	677	-1086	-409
96,64	9,20	441	-674	-233	765	-1169	-404
96,14	9,70	451	-681	-230	782	-1181	-399
95,64	10,20	637	-875	-238	1105	-1518	-413
95,14	10,70	798	-1027	-229	1384	-1782	-397
94,64	11,20	807	-1041	-234	1400	-1806	-406
94,14	11,70	859	-1088	-229	1490	-1887	-397
93,64	12,20	826	-1059	-233	1433	-1837	-404
93,14	12,70	878	-1108	-230	1523	-1922	-399
92,64	13,20	831	-1070	-239	1442	-1856	-415
92,14	13,70	752	-978	-226	1305	-1697	-392
91,64	14,20	805	-1038	-233	1397	-1801	-404
91,14	14,70	802	-1033	-231	1391	-1792	-401
90,64	15,20	786	-1017	-231	1364	-1764	-401
90,14	15,70	804	-1040	-236	1395	-1804	-409
89,64	16,20	760	-993	-233	1318	-1723	-404
89,14	16,70	722	-951	-229	1253	-1650	-397
88,64	17,20	726	-955	-229	1259	-1657	-397
88,14	17,70	738	-968	-230	1280	-1679	-399
87,64	18,20	736	-965	-229	1277	-1674	-397
87,14	18,70	771	-1001	-230	1338	-1737	-399
86,64	19,20	694	-944	-250	1204	-1638	-434
86,14	19,70	429	-655	-226	744	-1136	-392
85,64	20,20	411	-632	-221	713	-1096	-383
85,14	20,70	367	-590	-223	637	-1024	-387
84,64	21,20	333	-554	-221	578	-961	-383

Quadro A40-2 – Tubo F1, campanha 41 (2018-10-24). Dados de leitura com e sem correção de sensibilidade – *continuação*.

84,14	21,70	286	-499	-213	496	-866	-370
NOTA: os limites de confiança para somas corrigidas são $10(1 - ds) \approx 18$ un.			Média:	-231,74		Média:	-402,03
			Desv. Pad.:	5,74		Desv. Pad.:	9,95

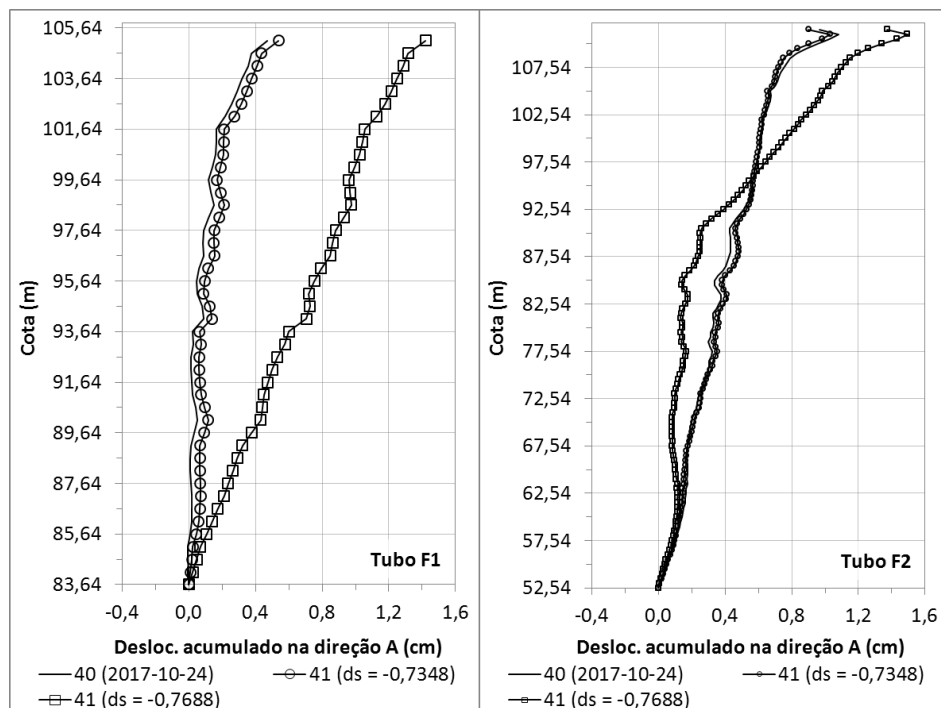


Figura A48 – Tubos F1 e F2, campanhas 40 e 41. Correção dos deslocamentos acumulados da campanha 41 com e sem ponderação do valor médio de  $\bar{d}_s$ .

O parâmetro  $\bar{d}_s$  permite ainda a determinação da constante instrumental correspondente à sensibilidade verificada ( $k_c$ , (113), 6.4.5):

$$k_c = k / (1 - \bar{d}_s)$$

, onde  $k$  é a constante instrumental de origem. Sabendo-se que a contante de origem deste sistema é  $k = 50000$ , as constantes globais com e sem ponderação correspondem a  $k_c = 28822$  e  $k_c = 28268$ , respetivamente.

## ANEXO X: DERIVA SISTEMÁTICA DO DESVIO NA ORIGEM EM PROFUNDIDADE DEVIDO AO INGRESSO DE ÁGUA NA Sonda INCLINOMÉTRICA

### Introdução e enquadramento

Este caso de obra enquadra-se no desenvolvimento de uma patologia num instrumento que passou despercebida durante algum tempo. Os dados de obra provenientes deste instrumento vêm revelando valores elevados de desvio padrão com frequência crescente. Contudo, esta ocorrência não é comum a todos os tubos observados com o mesmo inclinómetro e as curvas de deslocamento raramente merecem atenção redobrada.

Com o agravamento deste problema ao longo do tempo, verificou-se o desenvolvimento de perfis de somas de leituras tendenciosos na direção *A*. Contudo, a inconsistência destes acontecimentos não permitiram um diagnóstico conclusivo.

Posteriormente à execução dos ensaios apresentados no Anexo III, executaram-se medições de verificação inclinométrica no tubo-prova<sup>1</sup> e procedeu-se a uma análise mais aprofundada das leituras inclinométricas. Verificou-se haver relação entre os níveis de água medidos nos tubos inclinométricos e a deriva ocorrida nos perfis de somas, tendo-se concluído que o problema se deve ao ingresso de água na sonda. Em certo momento o acelerómetro da direção *B* avariou, encontrando-se este inclinómetro atualmente fora de serviço.

Este tipo de problema caracteriza-se por um erro de sensibilidade (Anexo IX), mas nunca foi concretamente avaliado. A alteração de sensibilidade é variável em profundidade e dependente do nível de água no tubo. Logo, esta alteração agrava-se em função de:

- cota do nível de água (in ex.: colunas de água superiores agravam o problema);
- variação do nível de água (in ex.: níveis mais variáveis agravam o problema);
- profundidade do tubo (in ex.: maior profundidade agrava o problema);
- inclinação do tubo (in ex.: inclinação mais acentuada agrava o problema).

A análise do problema concentrar-se-á unicamente sobre a direção *A*, uma vez que as alterações verificam-se quase exclusivamente nesta direção, por vezes com alterações significativas da média das somas respetiva. Alterações na direção *B* só surgiram numa fase tardia, mesmo assim sem a expressão das verificadas na direção *A*.

Nas figuras A49 a A52 apresentam-se alguns perfis de somas de leituras de algumas campanhas executadas em duas obras distintas, designadas por A e B. Nestes perfis é claro que as somas de leituras derivam em função do nível de água, sendo essa deriva tão maior quanto maior for a co-

---

<sup>1</sup> Tubo inclinométrico instalado no *campus* do LNEC para execução de medições de verificação inclinométrica.

luna de água no interior do tubo.

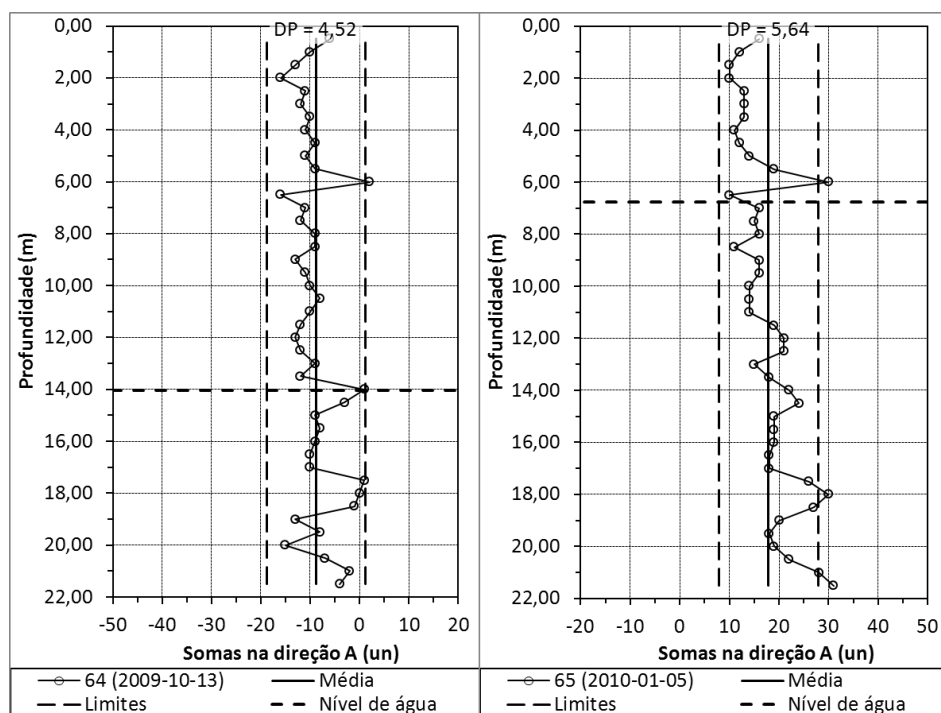


Figura A49 – Obra A, tubo A20. Perfis de somas de leituras e níveis de água das campanhas 64 e 65.

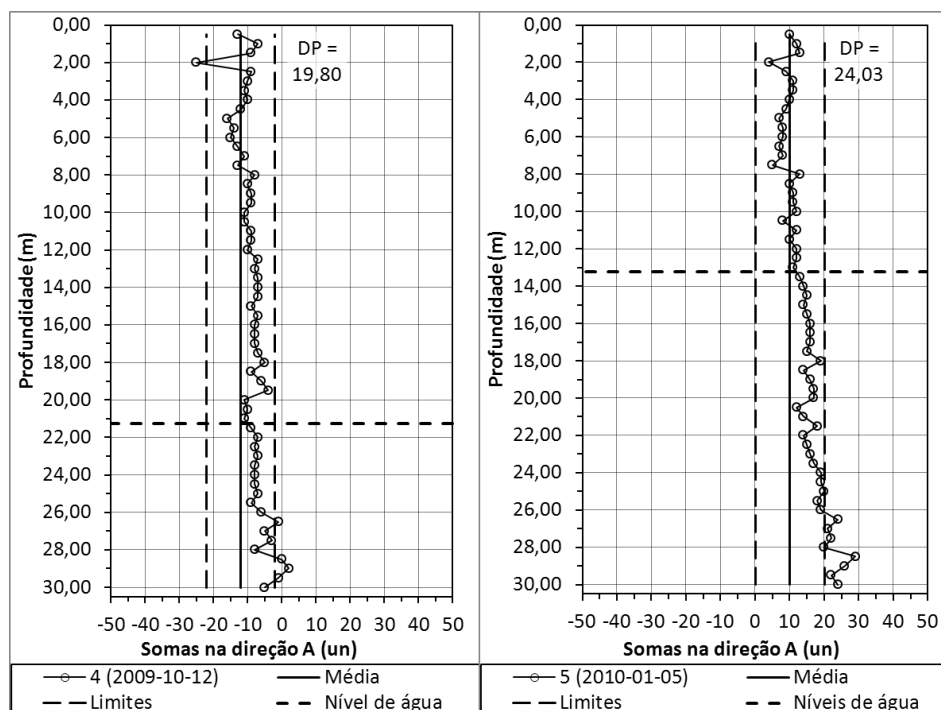


Figura A50 – Obra A, tubo A31. Perfis de somas de leituras e níveis de água das campanhas 4 e 5.

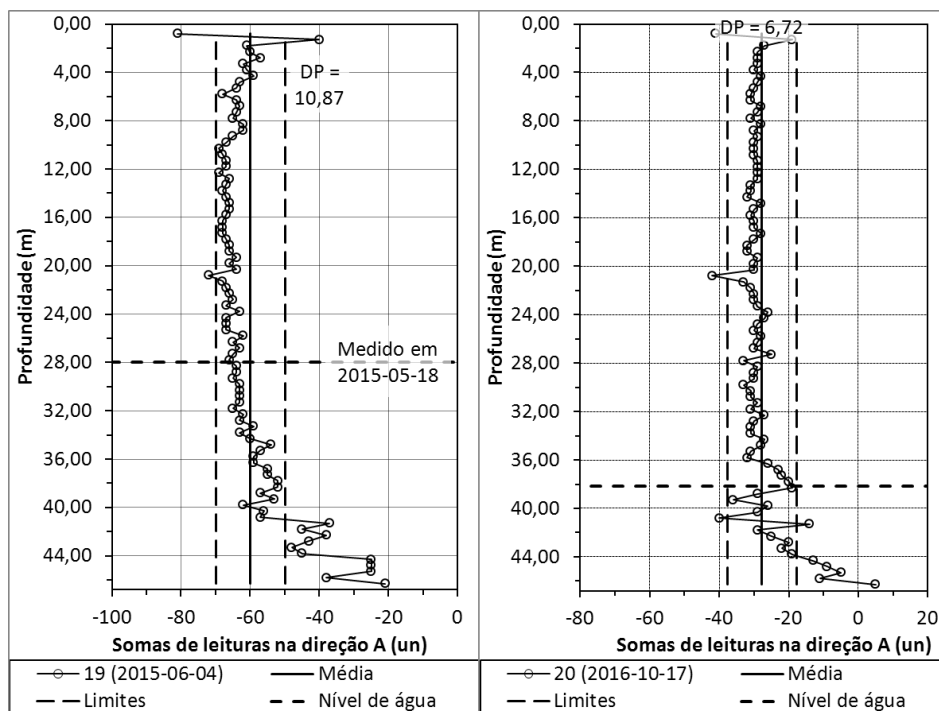


Figura A51 – Obra B, tubo B2. Perfis de somas de leituras e níveis de água das campanhas 19 e 20.

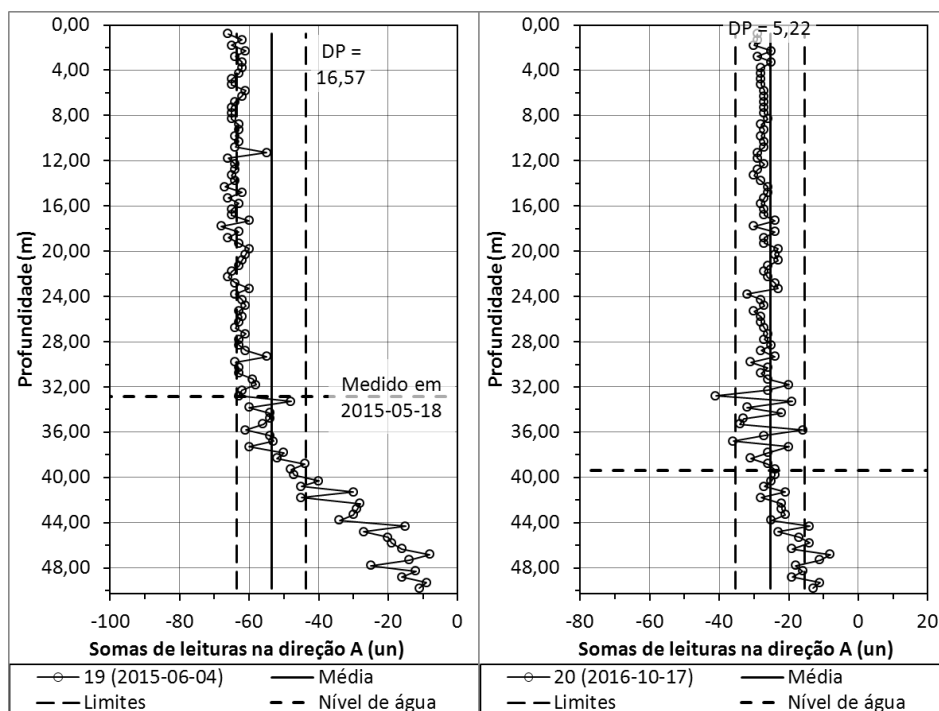


Figura A52 – Obra B, tubo B3. Perfis de somas de leituras e níveis de água das campanhas 19 e 20.

### Diagnóstico

O erro produzido por este fenómeno é particularmente difícil de avaliar por três razões principais:

- o problema foi-se desenvolvendo lentamente durante um longo período de tempo, dificultando a distinção entre a ocorrência de deslocamentos legítimos e fictícios;
- iniciaram-se novos históricos de observação quando o problema já existia;

- dependendo das características geotécnicas na zona de cada instalação, a variação dos níveis de água pode produzir o desenvolvimento (ou a oscilação) de deslocamentos, o que dificulta a distinção entre os fenómenos geotécnicos e instrumentais.

A análise das campanhas afetadas é um processo que decorre unicamente para efeitos de investigação. Até ao momento conclui-se que, na grande maioria dos casos, os erros produzidos mantêm-se dentro dos valores admissíveis. Também se observa que as variações do nível de água produzem variações de deslocamento impercetíveis ou dificilmente atribuíveis a um erro. No entanto, em tubos longos com inclinações e colunas de água consideráveis, é possível verificar que a deriva introduz componentes de deslocamento de origem instrumental.

Nos quadros A41 a A44 apresentam-se as avaliações do erro das campanhas 19 e 20 dos tubos B2 e B3 (figuras A51 e A52). O método utilizado apoia-se na equação (93) (6.4.2). Nos Anexos VI e XI discute-se a aplicação deste método de forma mais aprofundada.

Quadro A41-1 – Tubo B2, campanha 19. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continua na próxima página.*

Prof. (m)	Índice <i>i</i>	$l_{p,i} - l_{r,i} = \Delta l_i$		$\sum \Delta l_i$ $-2\Delta b$	Erro estimado (mm)	
		0°	180°		Incremental	Acumulado
0,80	92	-18	-54	-9		2,58

[...]

26,30	41	-33	-34	-4		2,58
26,80	40	-12	-52	-1		2,58
27,30	39	-28	-42	-7		2,58
27,80	38	-35	-34	-6		2,58
28,30	37	-34	-33	-4		2,58
28,80	36	-26	-41	-4		2,58
29,30	35	-22	-47	-6		2,58
29,80	34	-36	-29	-2		2,58
30,30	33	-32	-33	-2		2,58
30,80	32	-31	-35	-3		2,58
31,30	31	-29	-41	-7		2,58
31,80	30	-31	-37	-5		2,58
32,30	29	-30	-38	-5		2,58
32,80	28	-36	-27	0		2,58
33,30	27	-28	-33	2		2,58
33,80	26	-26	-39	-2		2,58
34,30	25	-27	-35	1		2,58
34,80	24	-25	-33	5		2,58
35,30	23	-25	-34	4		2,58
35,80	22	-32	-30	1		2,58

Quadro A41-2 – Tubo B2, campanha 19. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continuação*.

36,30	21	-26	-37	0		2,58
36,80	20	-23	-35	5		2,58
37,30	19	-26	-29	8		2,58
37,80	18	-24	-33	6		2,58
38,30	17	-23	-31	9		2,58
38,80	16	-13	-45	5		2,58
39,30	15	-19	-36	8		2,58
39,80	14	-30	-31	2		2,58
40,30	13	-39	-22	2		2,58
40,80	12	-17	-44	2		2,58
41,30	11	-14	-25	24	0,24	2,58
41,80	10	-18	-27	18	0,18	2,33
42,30	9	-21	-18	24	0,24	2,15
42,80	8	-27	-19	17	0,17	1,90
43,30	7	-27	-23	13		1,73
43,80	6	-18	-31	14	0,14	1,73
44,30	5	-15	-9	39	0,39	1,58
44,80	4	-28	-7	28	0,28	1,19
45,30	3	-9	-16	38	0,38	0,90
45,80	2	-5	-39	19	0,19	0,52
46,30	1	-11	-20	32	0,32	0,32

Quadro A42-1 – Tubo B2, campanha 20. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continua na próxima página*.

Prof.	Índice	$l_{p,i} - l_{r,i} = \Delta l_i$		$\sum \Delta l_i$	Erro estimado (mm)	
(m)	i	0°	180°	$-2\Delta b$	Incremental	Acumulado
0,80	92	12	-44	-1		1,01

[...]

36,30	21	-9	-21	1		1,01
36,80	20	-7	-19	5		1,01
37,30	19	-6	-16	9		1,01
37,80	18	-6	-19	6		1,01
38,30	17	-7	-14	10		1,01
38,80	16	0	-30	1		1,01
39,30	15	-14	-24	-7		1,01
39,80	14	-19	-6	6		1,01
40,30	13	-26	-8	-3		1,01
40,80	12	-12	-32	-13		1,01
41,30	11	0	-16	15	0,15	1,01
41,80	10	-8	-21	2		0,86
42,30	9	-15	-11	5		0,86
42,80	8	-9	-14	8		0,86



Quadro A42-2 – Tubo B2, campanha 20. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continuação*.

43,30	7	-14	-10	7		0,86
43,80	6	-8	-15	8		0,86
44,30	5	-9	-3	19	0,19	0,86
44,80	4	-17	-2	12		0,67
45,30	3	-1	-4	26	0,26	0,67
45,80	2	2	-19	14	0,14	0,40
46,30	1	7	-12	26	0,26	0,26

Quadro A43-1 – Tubo B3, campanha 19. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continua na próxima página*.

Prof.	Índice	$l_{p,i} - l_{r,i} = \Delta l_i$		$\sum \Delta l_i$	Erro estimado (mm)	
(m)	i	0°	180°	$-2\Delta b$	Incremental	Acumulado
0,80	99	-23	-46	-11		6,28

[...]

31,3	38	-31	-31	-4		5,44
31,8	37	-33	-28	-3		5,44
32,3	36	-52	-26	-20	0,20	5,44
32,8	35	-33	-25	0		5,24
33,3	34	-38	-21	-1		5,24
33,8	33	-47	-27	-16	0,16	5,24
34,3	32	-28	-37	-7		5,09
34,8	31	-37	-23	-2		5,09
35,3	30	-38	-13	7		5,09
35,8	29	-25	-49	-16	0,16	5,09
36,3	28	-29	-24	5		4,93
36,8	27	-30	-23	5		4,93
37,3	26	-30	-28	0		4,93
37,8	25	-28	-22	8		4,93
38,3	24	-20	-29	9		4,93
38,8	23	-22	-23	13		4,93
39,3	22	-30	-24	4		4,93
39,8	21	-27	-23	8		4,93
40,3	20	-18	-23	17	0,17	4,93
40,8	19	-24	-23	11		4,76
41,3	18	-45	-4	9		4,76
41,8	17	-38	-11	9		4,76
42,3	16	-25	-14	19	0,19	4,76
42,8	15	-28	-11	19	0,19	4,56
43,3	14	-26	-12	20	0,20	4,37
43,8	13	-34	-7	17	0,17	4,17
44,3	12	-13	-24	21	0,21	3,99
44,8	11	-10	-24	24	0,24	3,78

Quadro A43-2 – Tubo B3, campanha 19. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continuação*.

45,3	10	-23	-4	31	0,31	3,53
45,8	9	-24	-7	27	0,27	3,22
46,3	8	-10	-19	29	0,29	2,94
46,8	7	-19	0	39	0,39	2,65
47,3	6	-8	-9	41	0,41	2,26
47,8	5	-6	-21	31	0,31	1,84
48,3	4	-16	-6	36	0,36	1,53
48,8	3	-19	-8	31	0,31	1,16
49,3	2	-10	-11	37	0,37	0,85
49,8	1	3	-14	47	0,47	0,47

Quadro A44 – Tubo B3, campanha 20. Avaliação do erro através da equação (93) (6.4.2) – *continua na próxima página*.

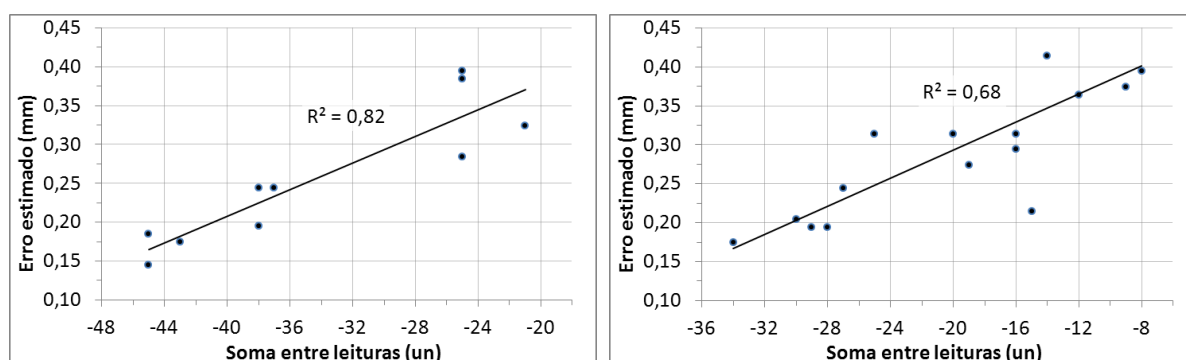
Prof. (m)	Índice <i>i</i>	$l_{p,i} - l_{r,i} = \Delta l_i$		$\sum \Delta l_i$ $- 2\Delta b$	Erro estimado (mm)	
		0°	180°		Incremental	Acumulado
0,80	99	-4	-28	-2		1,26

[...]

37,8	25	-15	-11	4		0,33
38,3	24	-12	-16	2		0,33
38,8	23	-11	-16	3		0,33
39,3	22	-17	-13	0		0,33
39,8	21	-15	-12	3		0,33
40,3	20	-10	-16	4		0,33
40,8	19	-14	-15	1		0,33
41,3	18	-30	-10	-10		0,33
41,8	17	-19	-13	-2		0,33
42,3	16	-17	-16	-3		0,33
42,8	15	-20	-12	-2		0,33
43,3	14	-15	-14	1		0,33
43,8	13	-21	-11	-2		0,33
44,3	12	-13	-23	-6		0,33
44,8	11	-8	-22	0		0,33
45,3	10	-18	-6	6		0,33
45,8	9	-19	-7	4		0,33
46,3	8	-14	-18	-2		0,33
46,8	7	-20	1	11		0,33
47,3	6	-13	-1	16	0,16	0,33
47,8	5	-1	-19	10		0,17
48,3	4	-12	-14	4		0,17
48,8	3	-16	-14	0		0,17
49,3	2	-9	-14	7		0,17
49,8	1	1	-14	17	0,17	0,17

Nos quadros A41 a A44 verifica-se que colunas de água maiores traduzem-se em maior quantidade de secções afetadas e em estimativas de erro superiores. Verifica-se também que não só as estimativas de erro são superiores, como também tendem a crescer em profundidade (in ex.: estimativas incrementais nos quadros A41 e A43).

O crescimento do erro incremental em profundidade é difícil de suportar do ponto de vista geotécnico, principalmente quando a deriva da estimativa é coincide com a deriva das somas das leituras. Na figura A53 apresentam-se as relações entre as estimativas de erro incremental e as somas das leituras. Com base na análise apresentada conclui-se que o ingresso de água na sonda introduz alterações de sensibilidade que variam em função da coluna de água presente.



a) *Tubo B2, campanha 19, profundidades 41,30 m a 46,30 m.* b) *Tubo B3, campanha 19, profundidades 42,30 m a 49,80 m.*

Figura A53 – Relações entre as variações das derivas do erro estimado e das somas entre leituras na campanha 19 dos tubos B2 e B3.

## Correção

Os procedimentos de correção serão apresentados em referência à figura 91 (6.4.5). Esta figura retrata uma campanha executada na obra A, cujo tubo é designado A23. Este é um bom exemplo porque a coluna de água é bastante elevada, sendo a deriva das somas bastante expressiva e praticamente linear. Além do mais, este tubo apresenta deslocamentos consideráveis, sendo este também um fator positivo para efeitos de demonstração.

Sabendo-se que existe um erro de sensibilidade que varia em profundidade, exprimindo-se essa variação em função da deriva das somas de leituras, a correção das leituras pode fazer-se de duas formas distintas:

- Determinação do parâmetro  $\bar{d}_s$  ((110), 6.4.5; Anexo IX) em cada secção afetada e de uma função de ajuste que exprima a variação deste parâmetro. A correção é posteriormente aplicada com base na equação (112) (6.4.5; Anexo IX), integrada na função determinada.
- Correção da deriva das somas através de uma função de ajuste e posterior determinação de um parâmetro  $\bar{d}_s$  médio ((110), 6.4.5; Anexo IX). Neste caso a deriva de  $\bar{d}_s$  é eliminada à

*priori* e a correção aplica-se diretamente a partir da equação (112) (6.4.5; Anexo IX).

Sabendo-se que a fiabilidade de  $\bar{d}_s$  está associada ao nível de variabilidade que este parâmetro apresenta em profundidade (Anexo IX), é preferível optar pela solução *b*), uma vez que é mais difícil de avaliar a variabilidade de um parâmetro que apresenta tendência.

A solução *a*) só terá importância para determinar o sentido de leitura em que a deriva ocorre. Esta questão não será aqui abordada porque ainda se encontra em estudo. No entanto, será demonstrado que *b*) elimina efetivamente a deriva do erro de sensibilidade, tornando-o numa constante mais fácil de determinar, independentemente do sentido de leitura analisado.

Na figura A54 apresentam-se as somas de leituras com e sem correção da deriva, tendo sido a correção aplicada de acordo com a expressão (116) (6.4.5), com  $m = 2,05$ ,  $P_0 = 3,0\text{ m}$ ,  $P_1 = 3,5\text{ m}$  e  $P_n = 29,0\text{ m}$ .

Na figura A55 apresentam-se os resultados da avaliação do erro com base nas leituras com e sem correção da deriva das somas. O método utilizado para avaliação do erro baseia-se na equação (93) (6.4.2), conforme aplicada nos anexos VI e XI. Adicionalmente apresenta-se a avaliação do erro em zona estável com base na equação (92) (6.4.2) (in ex.: pressupondo a inexistência de deslocamentos significativos na zona avaliada).

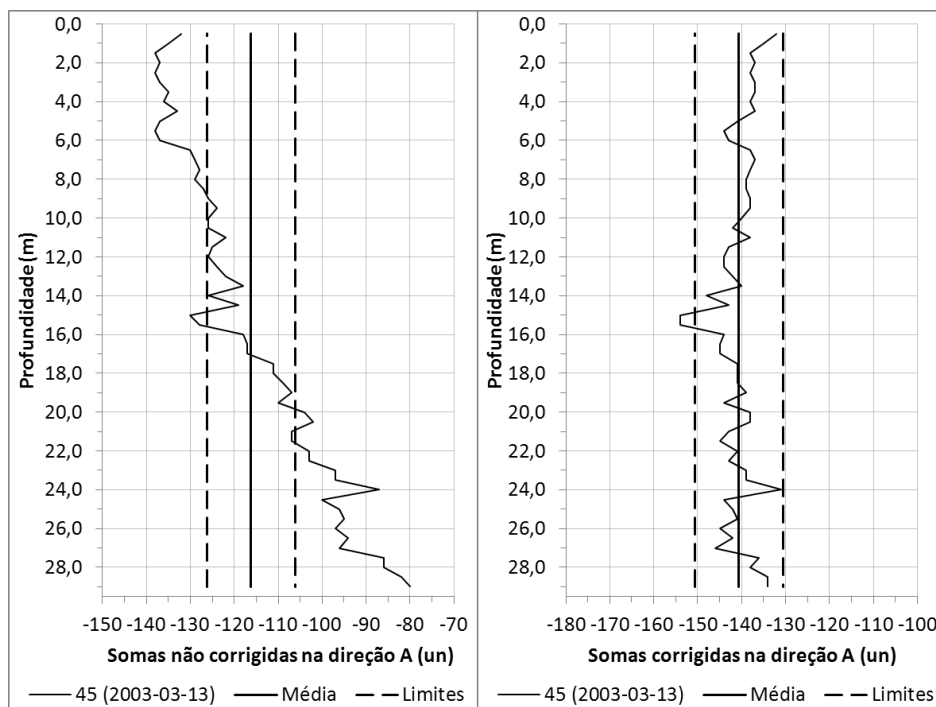
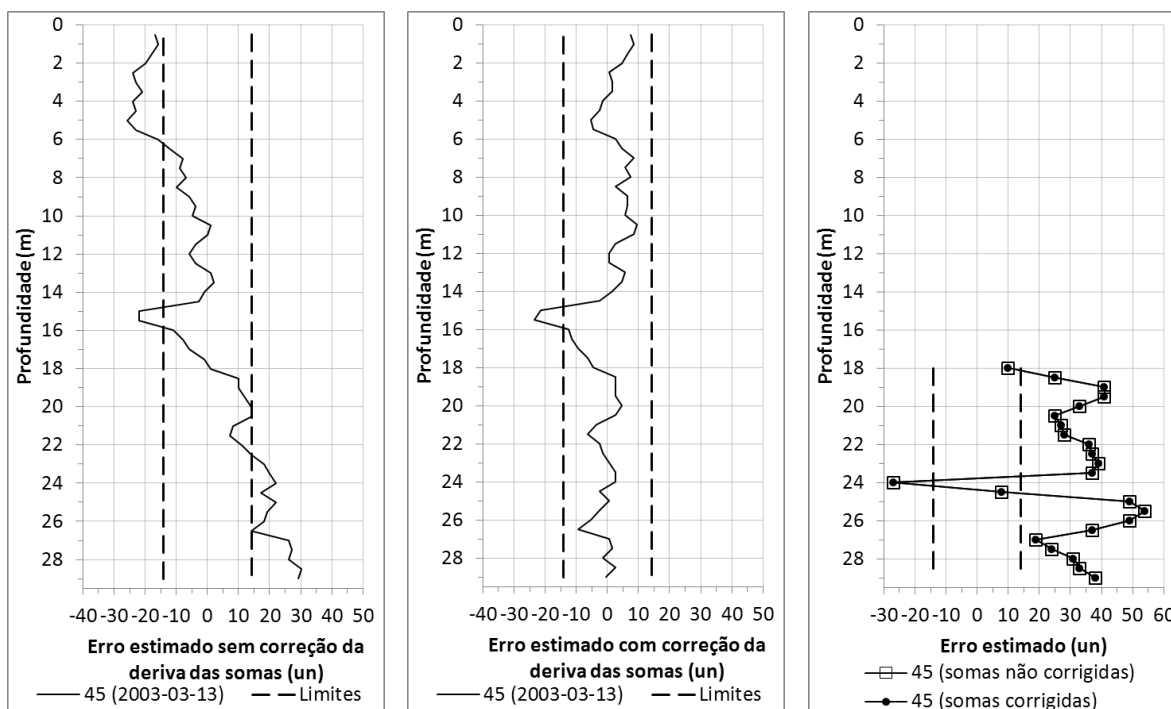


Figura A54 – Tubo A23, campanha 45. Perfis de somas de leituras na direção *A* com e sem correção de tendência.



a) Equação (93) aplicada a leituras inclinométricas sem correção de tendência.

b) Equação (93) aplicada a leituras inclinométricas com correção de tendência.

c) Equação (92) aplicada a leituras inclinométricas com e sem correção de tendência.

Figura A55 – Tubo A23, campanha 45. Análise do erro através das equações (93) (6.4.2) e (92) (6.4.2).

Na figura A55 observa-se:

- A correção da deriva das somas resulta na eliminação da tendência no perfil de avaliação do erro pela equação (93). Este facto é expectável, já que o sucesso do método de avaliação utilizado depende do uso de um valor de  $\mu$  adequado. Por isso é normal que a equação (93) espelhe as somas entre leituras.
- Apesar da equação (93) (6.4.2) não identificar a presença de erro na grande maioria das secções, a equação (92) (6.4.2) acusa a presença de erros significativos ao longo da totalidade da zona considerada estável. Este facto deve-se à presença do erro de sensibilidade, o qual ainda não foi corrigido. Esta observação é importante porque revela que a equação (93) (6.4.2) é insensível à ocorrência de erros de sensibilidade, uma que vez que se baseia apenas na discrepância entre os deslocamentos medidos nos dois sentidos de cada direcção.

Na figura A56 apresentam-se os valores de  $\bar{d}_s$  determinados em cada secção de tubo ((110), 6.4.5). O significado das siglas que identificam os conjuntos de dados é o seguinte:

- Somas não corrigidas (in ex.: leituras com tendência):
  - o ds A: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos da direcção A.
  - o ds A0: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos do sentido 0° da direcção A.

- o ds\_A180: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos do sentido 180° da direção A.
- Somas corrigidas (in ex.: leituras sem tendência):
  - o ds\_A: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos da direção A.
  - o ds\_A0: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos do sentido 0° da direção A.
  - o ds\_A180: coeficiente  $\bar{d}_s$  determinado a partir dos valores acumulados de desvio e de deslocamentos do sentido 180° da direção A.

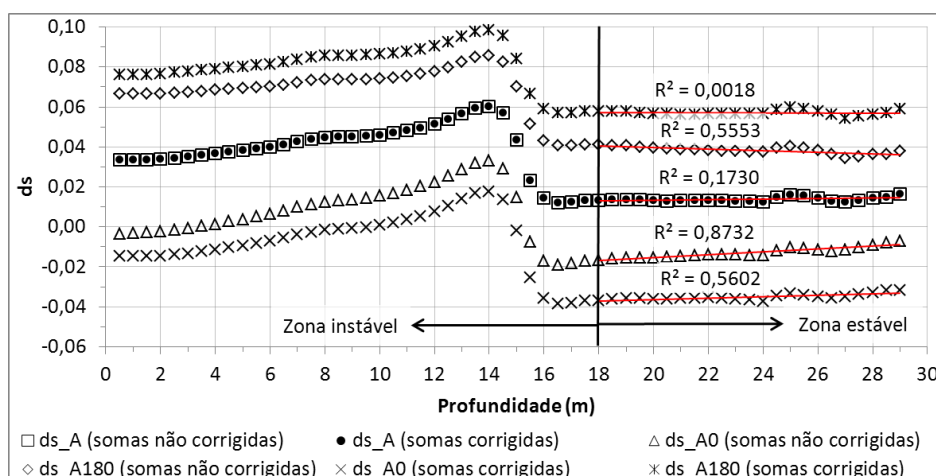


Figura A56 – Tubo A23, campanha 45. Parâmetros de deriva de sensibilidade obtidos em cada secção.

No quadro A45 apresentam-se os valores médios de  $\bar{d}_s$  obtidos a partir de cada curva da figura A56 em zona estável. Da análise deste quadro e da figura A56 conclui-se:

- os parâmetros obtidos a partir dos valores acumulados da direção A (in ex.: ds\_A) são idênticos, independentemente da correção prévia da deriva das somas;
- a correção da deriva das somas elimina a tendência que se verifica nos parâmetros do sentido A0 (in ex.: ds\_A0) e reduz a dispersão em ambos os sentidos A0 e A180;
- a tendência que se verifica no sentido A0 sem correção prévia (in ex.: ds\_A0 – somas não corrigidas) permite concluir que a deriva se dá durante a primeira sequência de leituras.

Quadro A45 – Tubo A23, campanha 45. Parâmetros de deriva da sensibilidade médios obtidos em zona considerada estável.

	Somas não corrigidas			Somas corrigidas		
	A	A0	A180	A	A0	A180
$\bar{d}_s$ :	0,0138	-0,0128	0,0383	0,0138	-0,0351	0,0571
$\sigma$ :	0,0011	0,0027	0,0018	0,0011	0,0015	0,0013
CV [%]:	7,93	20,84	4,59	7,93	4,38	2,21

Mediante os resultados do quadro A45, as leituras inclinométricas foram corrigidas por aplicação da equação (112) (6.4.5):

$$l_{c,i} = l_i(1 - \bar{d}_s)$$

, com  $\bar{d}_s = 0,0138$ . A mesma correção foi aplicada às leituras com e sem correção da deriva das somas, entre as profundidades 3,5 m e 29,0 m (in ex.: abaixo do nível de água; figura 91, 6.4.5).

Na figura A57 apresentam-se os perfis de somas obtidos após a aplicação da correção de sensibilidade sobre leituras com e sem correção prévia de tendência. Na figura A58 apresentam-se as avaliações do erro após a aplicação da mesma correção. Na figura A59 apresentam-se os perfis de deslocamento acumulado sem qualquer correção e com correção de sensibilidade sobre leituras com e sem correção prévia de tendência.

Da análise das figuras A57, A58 e A59 conclui-se:

- Os perfis de somas de leituras mantêm-se praticamente iguais após a correção da sensibilidade, apenas com diferenças de médias muito ligeiras.
- Os perfis de análise do erro através da equação (93) mantêm-se inalterados.
- Os perfis de análise do erro através da equação (92) atestam a correção do erro de sensibilidade, sendo estes resultados agora concordantes com os obtidos através da equação (93). Importa referir que nas profundidades onde a equação (92) acusa a existência de erro verificam-se deslocamentos em campanhas anteriores e posteriores à campanha 45, sendo natural que se obtenham estes resultados da equação (92).
- Os perfis de deslocamento acumulado atestam a eficácia da correção. Note-se que este fenómeno poderia facilmente confundir-se com um erro de alteração do desvio na origem (6.4.2, Anexo VI). Contudo, este fenómeno é repetível, o que indicia outro tipo de erro.

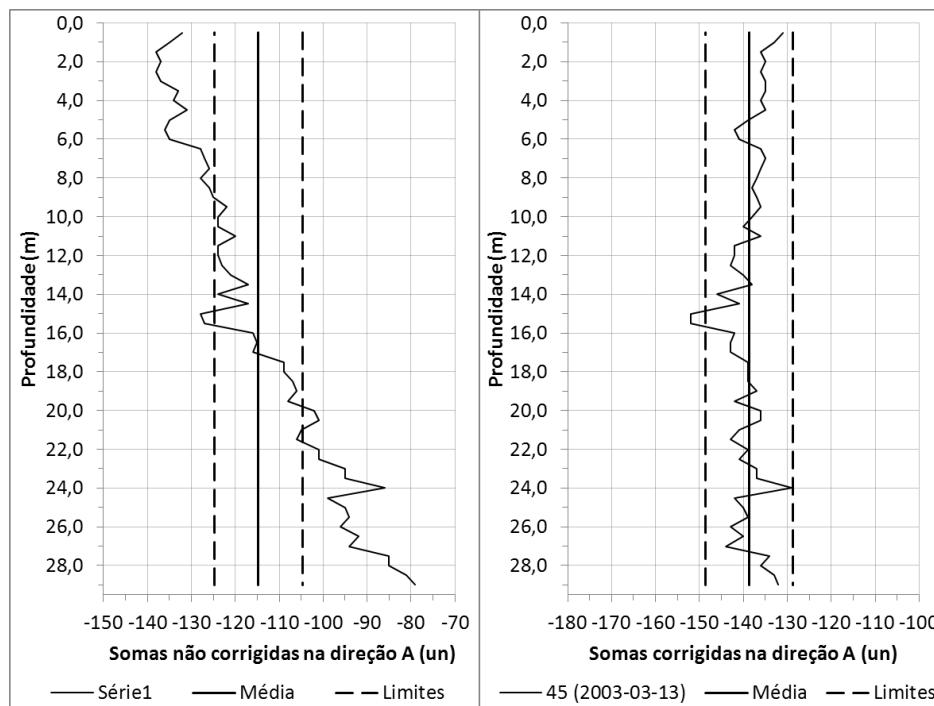
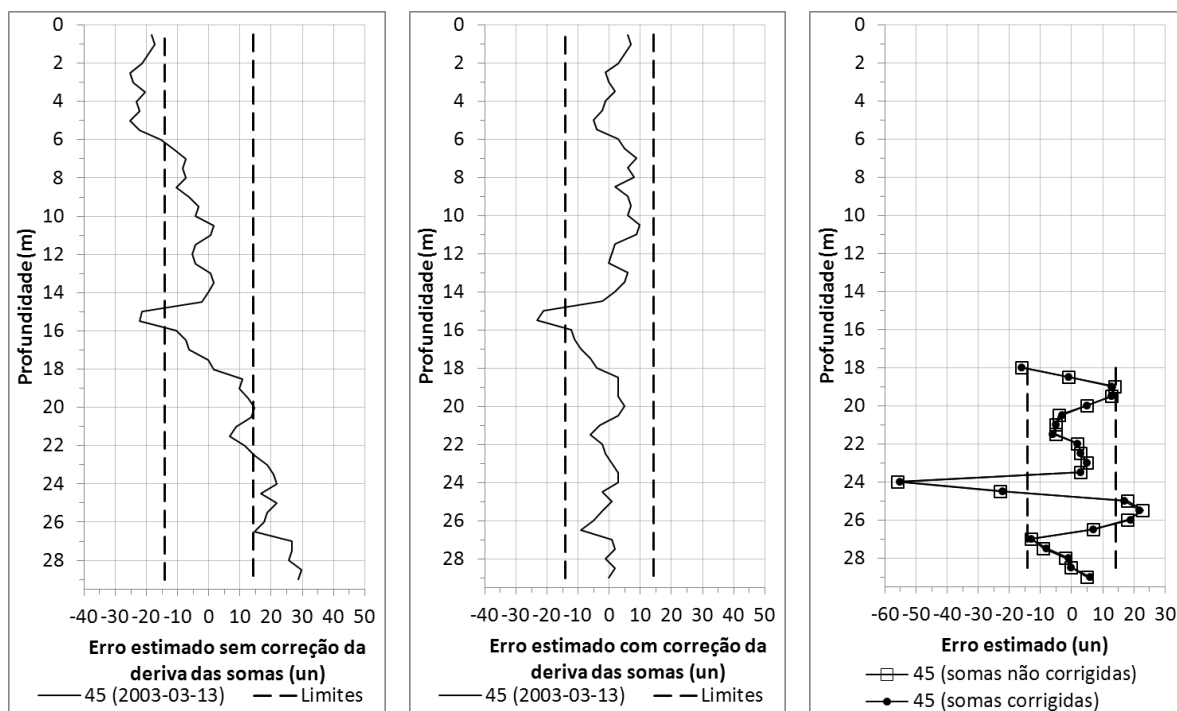


Figura A57 – Tubo A23, campanha 45. Perfis de somas de leituras. Correção de sensibilidade sobre leituras com e sem correção prévia de tendência.



a) Equação (93) aplicada a leituras inclinométricas sem correção de tendência. b) Equação (93) aplicada a leituras inclinométricas com correção de tendência. c) Equação (92) aplicada a leituras inclinométricas com e sem correção de tendência.

Figura A58 – Tubo A23, campanha 45. Análise do erro através das equações (93) (6.4.2) e (92) (6.4.2). Resultados obtidos após correção de sensibilidade.

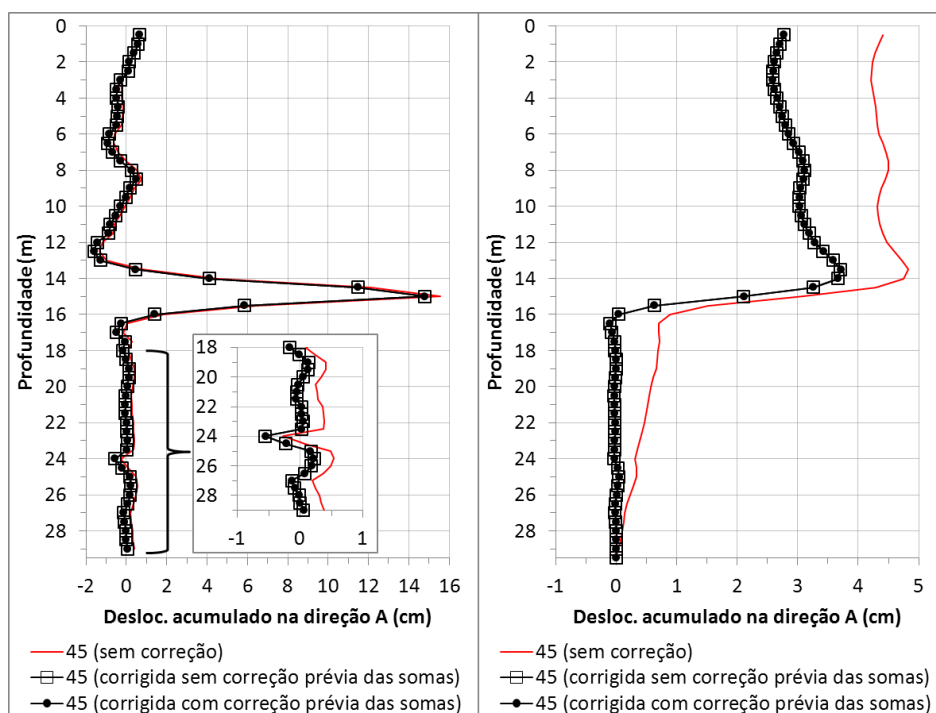


Figura A59 – Tubo A23, campanha 45. Perfis de deslocamentos com e sem correção de sensibilidade.

## Conclusão

A principal conclusão a retirar deste anexo é que o tipo de erro a tratar nem sempre é evidente.



Neste caso, o erro poderia ter-se confundido por um erro de alteração do desvio na origem. Muitas vezes não é suficiente fundamentar-se a identificação do fenómeno com base em padrões conhecidos, sendo também necessário o conhecimento das características próprias do erro, as quais derivam das causas respetivas. Neste caso, sabe-se que o erro de alteração do desvio é um fenómeno esporádico, que pode provocar a alteração definitiva do desvio, mas que nunca produz perfis de somas tendenciosos de forma sistemática e repetitiva.

A segunda conclusão é a utilidade da análise conjunta de dados de obra para rastreio e diagnóstico do desempenho dos instrumentos. Este problema seria praticamente impossível de compreender sem a agregação de informação de diferentes obras, incluindo a informação de diferentes dispositivos (in ex.: sondas piezométricas). Estas são tarefas que demoram muito tempo a executar, mas que deveriam estar incluídas nas rotinas de trabalho. Portanto, considera-se da maior importância apostar no desenvolvimento de ferramentas informáticas intuitivas que sejam capazes de fornecer este tipo de informação de forma rápida e organizada.

A terceira conclusão é que, neste caso, a correção prévia da tendência das somas de leituras não é necessária do ponto de vista da correção da sensibilidade, mas é uma mais-valia do ponto de vista da análise qualitativa dos dados corrigidos.

Finalmente refere-se que erros de sensibilidade muito pequenos podem resultar em erros acumulados muito importantes (figuras A59).

## **ANEXO XI: CORREÇÃO DE ERROS SISTEMÁTICOS PONTUAIS. DEMONSTRAÇÃO APLICADA EM CASOS DE OBRA**

### **Introdução**

Neste anexo descrevem-se os procedimentos de identificação e de correção de erros sistemáticos pontuais em duas situações distintas (6.4.7):

- erros sistemáticos pontuais em secções isoladas;
- erros sistemáticos pontuais em mais de duas secções de tubo contíguas.

O primeiro caso reporta-se a uma obra que envolve um talude com depósitos de vertente que escoregam sobre um maciço rochoso. Os terrenos estão suportados por estruturas ancoradas adjacentes a uma escola preparatória<sup>1</sup>. Os erros sistemáticos cuja correção se exemplifica são ocorrências relativamente comuns, mas muitas vezes suscitam dúvidas e obrigam à redundância dos serviços de observação. Pretende-se que os conceitos aqui apresentados contribuam para redução dessa redundância e para a melhoria dos resultados inclinométricos.

O segundo caso enquadra-se na observação de uma encosta rochosa a jusante duma barragem de betão (Anexo VII). O sistema inclinométrico habitualmente utilizado nesta obra avariou, tendo sido necessário substituí-lo. No entanto, anteriormente à substituição, manteve-se a utilização do sistema avariado em modo uniaxial<sup>2</sup>. Esta decisão foi mal sucedida devido ao desencalhamento sistemático da sonda na calha da direção *B*. Os dados recolhidos constituem uma boa base de estudo para a demonstração das potencialidades e das limitações das metodologias de análise e de correção introduzidas neste documento (6.4.2, 6.4.7). Pretende-se que a aplicação destas técnicas seja clarificada, demonstrando-se também o conjunto de condições necessário ao sucesso destas operações.

### **Erros sistemáticos pontuais em secções isoladas**

Na secção 6.4.7 exemplifica-se a correção das leituras da direção *B* das campanhas 45 e 51 através da análise das diferenças entre leituras de secções contíguas (figura 77, 6.3.3; figuras 93 e 94, 6.4.7). De acordo com a equação (120) (6.4.7), a soma entre diferenças obtidas em sentidos opostos de uma determinada secção de tubo deve incluir-se num intervalo de confiança definido em função do erro típico do sistema:

---

<sup>1</sup> Observação de taludes. Análise de dados. Atas do 7º Congresso Nacional de Geotecnia (7CNG), 10-13 de Abril de 2000. Sociedade Portuguesa de Geotecnia (SPG), Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP), 2:713-726.

<sup>2</sup> Utilizando-se apenas um dos acelerómetros, neste caso da direção *A*, e executando-se quatro sequências de leitura em vez de duas (in ex.: uma sequência em cada sentido, já que apenas uma direção é medida em cada sequência).

$$\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} = \pm \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a$$

, onde  $\Delta l_i$  representa a diferença entre leituras de secções contíguas.

Desta forma, a presença do erro identifica-se mediante a condição  $|\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180}| > \left| \frac{2}{\sqrt{2}} \varepsilon_a \right|$ , podendo a sua magnitude estimar-se em função do desvio da soma de leituras relativamente à média das somas de todas as leituras ((118), 6.4.7):

$$|\varepsilon_{s,i}| \cong |S_i - \mu|/2$$

Na secção 6.4.7 refere-se ainda que o erro se situa normalmente<sup>1</sup> no sentido que apresenta maior variação entre as leituras das secções interessadas.

Identificado o sentido a corrigir, a correção aplica-se de acordo com a equação (121) (6.4.7):

$$\mu_p \cong l_{p,i}^0 + l_{p,i}^{180} \Rightarrow \begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases}$$

Nos quadros A46 e A47 resumem-se os procedimentos de cálculo para identificação, estimativa e correção das leituras da direção *B* das campanhas 45 e 51, respetivamente (figura 77, 6.3.3; figuras 93 e 94, 6.4.7). Nestes quadros observa-se que a correção de poucas leituras tem um efeito muito positivo nos valores de desvio padrão. Observa-se ainda que:

- nem todas as somas fora dos limites de confiança correspondem à identificação de um erro através da equação (120) (6.4.7) –normalmente, estes erros não requerem correção;
- a secção 17 da campanha 45 produz duas indicações sucessivas de erro – tal como referido em 6.4.7, estas situações são as que merecem maior atenção;
- devido à ocorrência de erros sequenciais, coincidentemente num extremo do tubo, só a primeira das três secções corrigidas da campanha 51 acusa a presença de erro – esta situação demonstra que por vezes uma avaliação qualitativa bem sucedida requer uma perspetiva global da informação disponível (in ex.: somas, deslocamentos, etc.).

---

<sup>1</sup> Note-se que esta prática de identificação do sentido a corrigir constitui apenas a hipótese mais provável. Na verdade, este é sempre um processo de seleção por tentativa e erro.

Quadro A46 – Tubo I1, campanha 45. Análise e de correção de leituras com erros sistemáticos pontuais.

Tubo:	I1	Obra:	MERCEANA - ESCOLA PREPARAT	Eixo A		Eixo B		Correção de dados		
Camp.:	45	2001-09-17	Desvio padrão:	4,85		22,41		Desvio padrão: 11,36		
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:	3,49		5,90		$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases}$		
Cota	Índice	Eixo B			$l_{i+1} - l_i = \Delta l_i$					
(m)	i	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
132,74	39	-204	473	269	-	-	-			269
132,24	38	-225	497	272	21	-24	-3			272
131,74	37	-212	490	278	-13	7	-6			278
131,24	36	-179	459	280	-33	31	-2			280
130,74	35	22	269	291	-201	190	-11			291
130,24	34	80	197	277	-58	72	14			277
129,74	33	106	170	276	-26	27	1			276
129,24	32	122	154	276	-16	16	0			276
128,74	31	138	148	286	-16	6	-10			286
128,24	30	136	134	270	2	14	16			270
127,74	29	109	167	276	27	-33	-6			276
127,24	28	151	127	278	-42	40	-2			278
126,74	27	147	131	278	4	-4	0			278
126,24	26	153	120	273	-6	11	5			273
125,74	25	152	122	274	1	-2	-1			274
125,24	24	172	111	283	-20	11	-9			283
124,74	23	255	34	289	-83	77	-6			289
124,24	22	319	-39	280	-64	73	9			280
123,74	21	328	-43	285	-9					285
123,24	20	328	-45	283	0					283
122,74	19	372	-68	304	-44					304
122,24	18	389	-78	311	-17	10	-7			311
121,74	17	521	-117	404	-132	39	-93			286
121,24	16	432	-144	288	89	27	116			288
120,74	15	450	-162	288	-18	18	0			288
120,24	14	450	-162	288	0	0	0			288
119,74	13	461	-173	288	11	0				288
119,24	12	472	-190	282	-11	17	6			282
118,74	11	296	12	308	176	-202	-26			308
118,24	10	389	-82	307	-93	94				307
117,74	9	405	-103	302	-16	21	5			302
117,24	8	421	-144	277	-16	41	25			277
116,74	7	453	-162	291	-32	18	-14			291
116,24	6	460	-199	261	-7	37	30			261
115,74	5	567	-295	272	-107	96	-11			272
115,24	4	611	-317	294	-44	22	-22			294
114,74	3	590	-309	281	21	-8	13			281
114,24	2	597	-322	275	-7	13	6			275
113,74	1	581	-306	275	16	-16	0			275
			Média:	286,41					Média:	283,38

Quas diferenças contíguas com valores rejeitados ( $l_{17} - l_{16}$  e  $l_{18} - l_{17}$ ). Logo, o erro está na secção 17.

A maior variação ocorre no sentido 0º. Logo, a leitura a corrigir será, em princípio, a desse sentido (in ex.: 521).

Leitura corrigida no sentido 0º:  
 $286,41 - (-117) \approx 403$

Quadro A47 – Tubo I1, campanha 51. Análise e de correção de leituras com erros sistemáticos pontuais.

Tubo:	I1	Obra: MERCEANA - ESCOLA PREPARAT			Eixo A	Eixo B	Correção de dados			
Camp.:	51	2002-09-17	Desvio padrão:		5,54	16,48	Desvio padrão:		6,30	
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:		3,49	5,90	$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases}$			
Cota	Índice	Eixo B			$l_{i+1} - l_i = \Delta l_i$					
(m)	i	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma	0º	180º	Soma
132,74	39	-47	349	302	-	-	-			302
132,24	38	-66	364	298	19	-15	4			298
131,74	37	-55	353	298	-11	11	0			298
131,24	36	-22	326	304	-33	27	-6			304
130,74	35	89	213	302	-111	113	2			302
130,24	34	105	194	299	-16	19	3			299
129,74	33	118	177	295	-13	17	4			295
129,24	32	128	168	296	-10	9	-1			296
128,74	31	138	149	287	-10	19	9			287
128,24	30	149	143	292	-11	6	-5			292
127,74	29	127	185	312	22	-42	-20			312
127,24	28	160	141	301	-33	44	11			301
126,74	27	159	143	302	1	-2	-1			302
126,24	26	167	134	301	-8	9	1			301
125,74	25	162	137	299	5	-3	2			299
125,24	24	184	123	307	-22	14	-8			307
124,74	23	263	43	306	-79	80	1			306
124,24	22	331	-27	304	-68	70	2			304
123,74	21	342	-36	306	-11	9	-2			306
123,24	20	342	-36	306	0	0	0			306
122,74	19	365	-59	306	-23	23	0			306
122,24	18	374	-68	306	-9	9	0			306
121,74	17	411	-109	302	-37	41	4			302
121,24	16	448	-123	325	-38	23	15			317
120,74	15	463	-123	340	-15	15	0			313
120,24	14	458	-147	311	5	-3	2			311
119,74	13	466	-164	302	-8	17	9			302
119,24	12	479	-174	305	-13	10	-3			305
118,74	11	293	19	312	186	-193	-7			312
118,24	10	383	-75	308	88	-92	3			309
117,74	9	397	-94	303	-15	21	6			303
117,24	8	430	-128	302	-33	34	1			302
116,74	7	451	-155	296	-21	27	6			296
116,24	6	489	-184	305	-38	29	-9			305
115,74	5	583	-281	302	-94	97	3			302
115,24	4	624	-307	317	-41	26	-15			317
114,74	3	604	-242	362	20	-65	-45			308
114,24	2	615	-254	361	-11	12	1			308
113,74	1	592	-235	357	23	-19	4			308
			Média:	307,82						Média: 303,82

Note-se que só uma das secções acusa a existência de erro, mas o perfil de somas demonstra que há 3 secções afetadas. Este facto deve-se a várias secções contíguas com erros de magnitudes semelhantes, já que o erro é diagnosticado pelas diferenças entre secções.

A maior variação ocorre na direção B. Logo, a leitura a corrigir será, em princípio, a dessa direção (in ex.: -242; -254; -235).

Leituras corrigidas na direção B:

$$\mu_p - l^0 \approx l^{180}$$

### Erros sistemáticos pontuais em mais de duas secções de tubo contíguas

Na figura A60 apresentam-se os deslocamentos acumulados das seguintes 4 campanhas:

- 23-VII: campanha executada com o inclinómetro VII em modo uniaxial, utilizando-se apenas o acelerómetro da direção *A*. Os dados de cada direção obtiveram-se circulando a sonda com as rodas no par de calhas respetivo.
- 23-1DG: campanha executada com o inclinómetro 1DG em modo biaxial. Os dados de ambas as direções obtiveram-se circulando o instrumento no par de calhas da direção *A*.
- 23-1DG-A: campanha executada com o inclinómetro 1DG em modo uniaxial, utilizando-se apenas o acelerómetro da direção *A*. Os dados de cada direção obtiveram-se circulando a sonda com as rodas no par de calhas respetivo.

Importa referir que existe um erro de rotação não corrigido entre a campanha 23-VII e as restantes, claramente visível na figura A60 (direção *A*). Este erro deve-se à diferença entre o alinhamento axial dos acelerómetros dos dois sistemas e não foi corrigido porque este não é o foco que se pretende tratar. Neste contexto, refere-se que a correção de erros de rotação envolve a inter-relação de dados de ambas as direções *A* e *B*, o que introduz distorções nos dados de origem. Este processo dificulta a deteção e a correção posterior de outras anomalias. Por esta razão, os erros de rotação devem ser sempre os últimos a tratar.

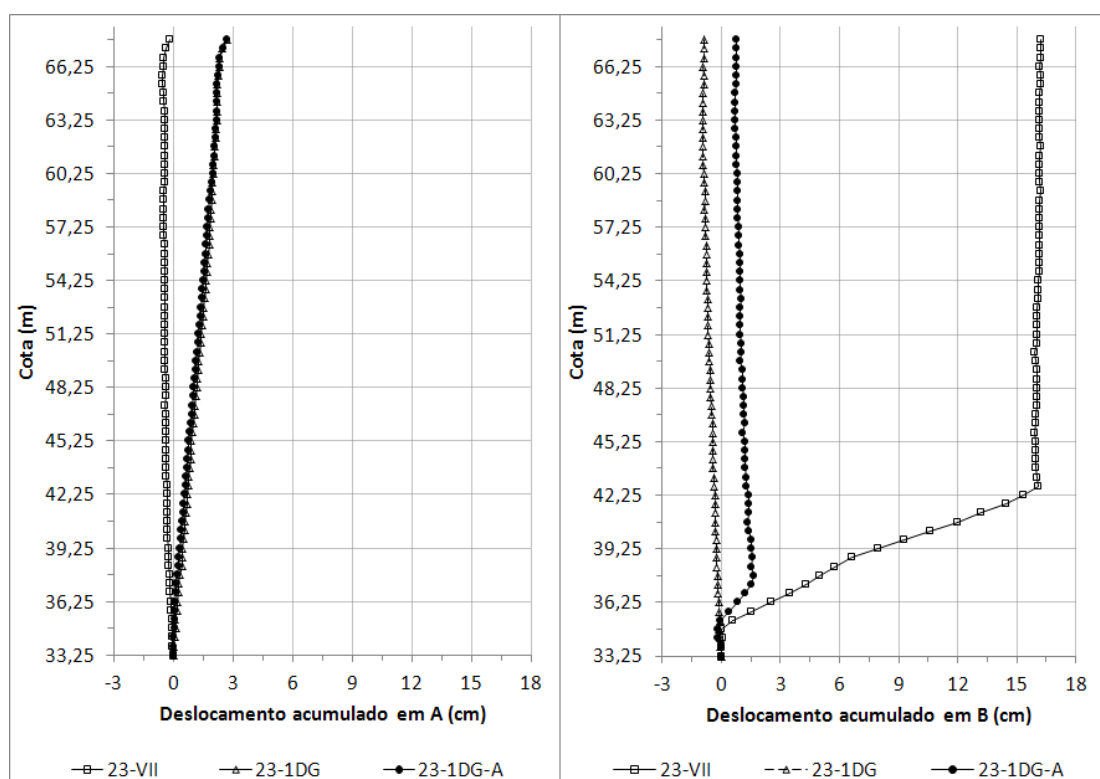


Figura A60 – Tubo R0. Deslocamentos acumulados das campanhas 23-VII, 23-1DG e 23-1DG-A.

Na figura A60 observa-se que os resultados obtidos na direção *B* são inconsistentes e apresentam

deslocamentos importantes na zona inferior do tubo. Esses deslocamentos não se verificam em modo biaxial, seja em campanhas anteriores ou atuais (in ex.: 23-1DG). A diferença está claramente no par de calhas onde as rodas inclinométricas circulam. Note-se que quando um tubo sofre um deslocamento na direção *A*, a deformação das calhas da direção *B* é transversal ao plano formado pelas mesmas, o que dificulta a circulação das rodas nesse plano.

Pensa-se que uma deformação particular das calhas da direção *B* provoque o desencaimento da sonda, voltando a mesma encalhar mais acima. Os perfis de somas de leituras da campanha 23-1DG parecem suportar esta hipótese, já que têm fraca qualidade na zona inferior do tubo, principalmente na direção *A* (figura A61). Outras campanhas apresentam perfis de somas com padrões idênticos, embora com magnitudes variáveis do desvio de somas relativamente à média.

Outro facto que também corrobora a hipótese dum desencaimento das rodas na direção *B* é a repetibilidade dos perfis de deslocamento nessa direção em modo uniaxial. Estes perfis são repetíveis com os dois sistemas inclinométricos, mas as deformações obtidas são dependentes do sistema utilizado. Esta diferença explica-se pela observação das rodas das duas sondas, verificando-se que o bisel das mesmas difere de sistema para sistema, o que altera as condições necessárias ao desencaimento/encalhamento de cada sonda.

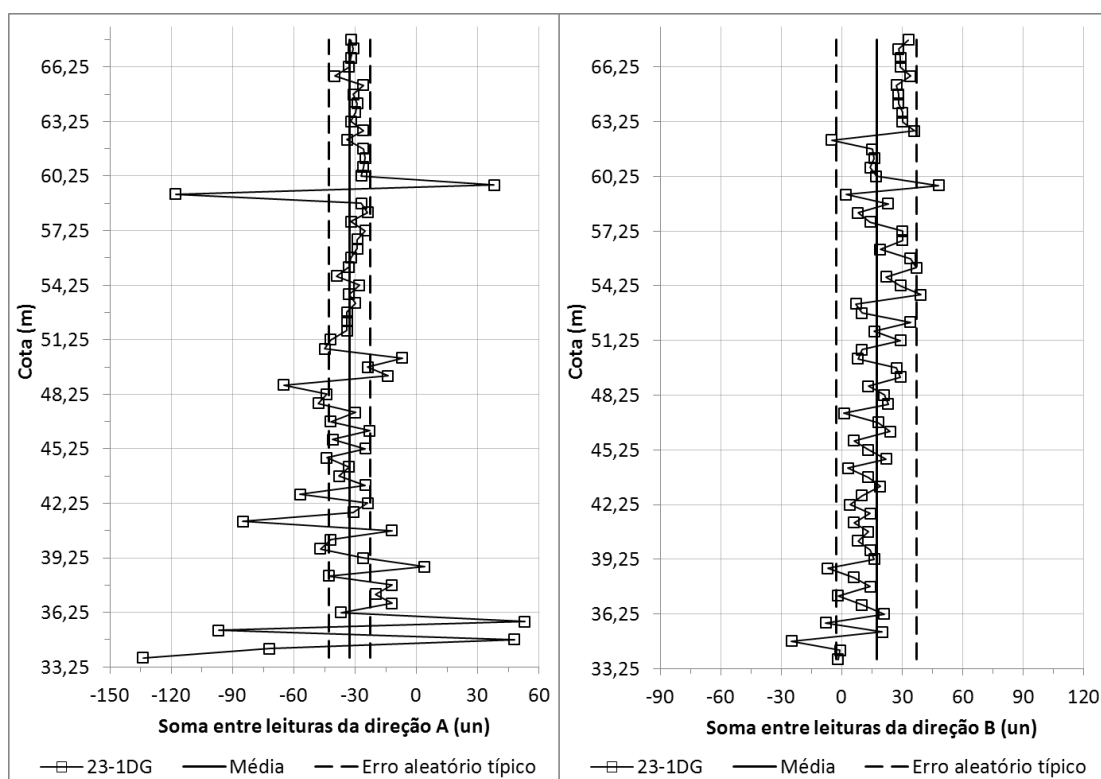


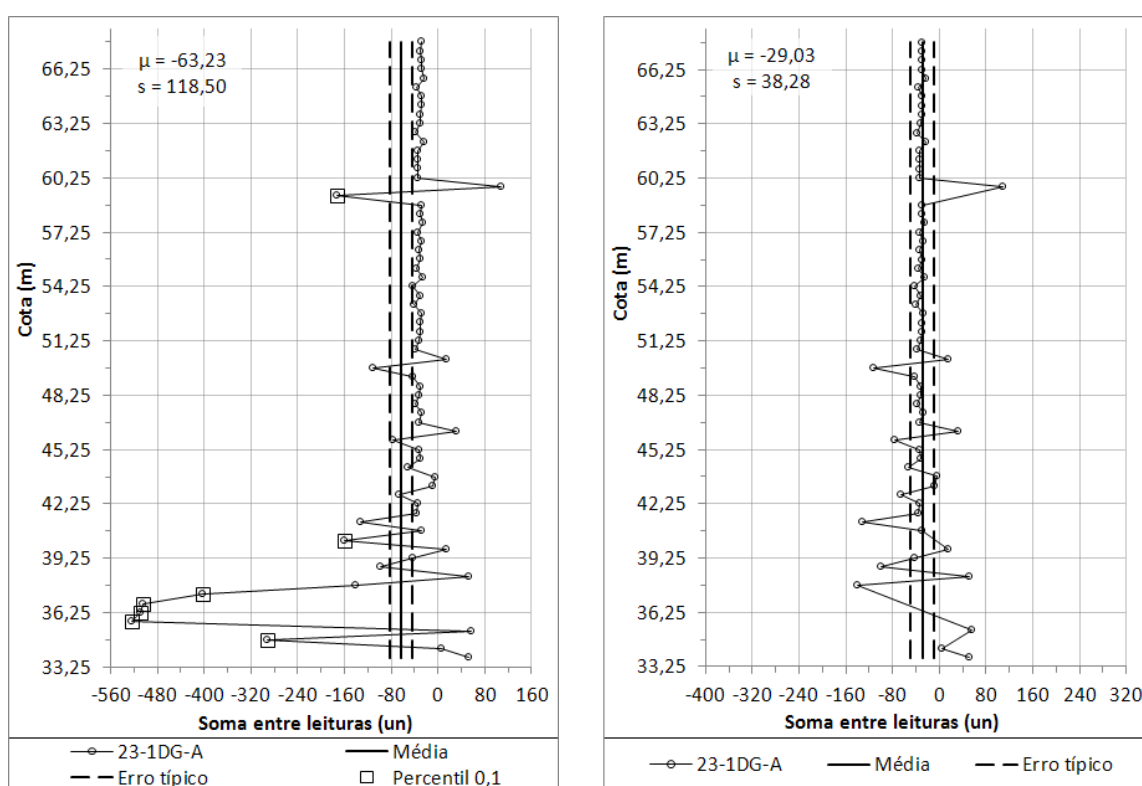
Figura A61 – Tubo R0. Perfil de somas de leituras da campanha 23-1DG.

O caso que se apresenta na figura 95 (6.4.7) refere-se à correção da curva 23-1DG-A na direção *B*. Esta curva constitui um bom exemplar porque se dispõe de uma boa referência (23-1DG).

Na figura A62a apresenta-se o perfil de somas de leituras da campanha 23-1DG-A na direção *B*. Nesta figura observa-se que a magnitude e a quantidade de erros na zona inferior do tubo é tal que o valor da média se encontra deslocado do conjunto de somas da zona superior do tubo.

Para corrigir esta situação, optou-se<sup>1</sup> pela eliminação do percentil inclusivo 0,1 ( $P_{0,1} = -145$ ) da distribuição de somas de leituras (in ex.:  $S_i \leq -145$ ). Na figura A62b apresenta-se o mesmo perfil de somas sem o percentil 0,1 (in ex.:  $-145 < S_i$ ). Nesta figura observa-se o seguinte:

- a média das somas foi corrigida e passou a representar corretamente o conjunto de somas;
- a média corrigida é próxima do valor tipicamente obtido com o acelerómetro utilizado<sup>2</sup>;
- o desvio padrão foi substancialmente reduzido.



a) Perfil de somas total da campanha 23-1DG-A na direção *B*. b) Perfil de somas da campanha 23-1DG-A na direção *B* sem o percentil 0,1.

Figura A62 – Tubo R0. Perfis de somas de leituras da campanha 23-1DG-A na direção *B* antes e após a remoção do conjunto de somas do percentil inclusivo 0,1.

Obtido um valor médio de somas mais fiável, pode proceder-se à correção de dados. O objetivo é obter-se uma curva de deslocamento representativa da curva 23-1DG (figura 95b, 6.4.7).

Na figura 95b (6.4.7) apresentam-se as curvas de deslocamento que resultam de quatro processos

<sup>1</sup> Esta decisão é suportada por dois fatores: a) a média encontra-se desviada no sentido negativo relativamente ao conjunto de somas da zona superior do tubo; b) as somas desviantes com maior magnitude são inferiores à média das somas.

<sup>2</sup> Ou seja, o acelerómetro da direção *A* ( $\mu = -32,74$  na campanha 23-1DG e  $\mu = -35,54$  na campanha 23R-1DG – não apresentada).



distintos de correção. Neste anexo importa abordar o processo iterativo ilustrado na figura 95a (6.4.7): correção baseada na equação (121) (6.4.7), cujo sentido a corrigir em cada iteração corresponde ao que apresenta maior diferença absoluta entre leituras de secções contíguas.

No quadro A48 resume-se o processo de cálculo utilizado em 4 iterações para corrigir 6 leituras do percentil 0,1. Excluindo-se a natureza iterativa do processo, este método nada difere do aplicado na correção das campanhas 45 e 51 (quadros A46 e A47).

Quadro A48-1 – Tubo R0, campanha 23-1DG-A. Resumo dos procedimentos iterativos de análise e de correção de leituras com erros sistemáticos pontuais – *continua na próxima página*.

Cota	Índice	Eixo B ( $\mu_p = -29,03$ )			$l_{i+1} - l_i = \Delta l_i$		$\begin{cases} l_{c,p,i}^0 = \mu_p - l_{p,i}^{180} \\ l_{c,p,i}^{180} = \mu_p - l_{p,i}^0 \end{cases}$	
(m)	i	0°	180°	Soma	0°	180°	0°	180°
ITERAÇÃO 1								
40,25	14	-1384	1224	-160			-1253	
39,75	13	-1222	1237	15	-162	-13		
39,25	12	-1250	1208	-42				
38,75	11	-1196	1097	-99				
38,25	10	-1341	1393	52				
37,75	9	-1336	1195	-141				
37,25	8	-1333	931	-402				
36,75	7	-1361	857	-504				
36,25	6	-1315	807	-508				
35,75	5	-1343	819	-524				
35,25	4	-1351	1407	56	8	-588		1314
34,75	3	-1564	1272	-292				
34,25	2	-1573	1578	5	9	-306		1535
33,75	1	-1437	1489	52				
ITERAÇÃO 2								
40,25	28,20	-1253	1224	-29				
39,75	28,70	-1222	1237	15				
39,25	29,20	-1250	1208	-42				
38,75	29,70	-1196	1097	-99				
38,25	30,20	-1341	1393	52				
37,75	30,70	-1336	1195	-141				
37,25	31,20	-1333	931	-402				
36,75	31,70	-1361	857	-504				
36,25	32,20	-1315	807	-508				
35,75	32,70	-1343	1314	-29	28	-507		1286
35,25	33,20	-1351	1407	56				
34,75	33,70	-1564	1535	-29				
34,25	34,20	-1573	1578	5				
33,75	34,70	-1437	1489	52				

Quadro A48-2 – Tubo R0, campanha 23-1DG-A. Resumo dos procedimentos iterativos de análise e de correção de leituras com erros sistemáticos pontuais – *continuação*.

ITERAÇÃO 3									
40,25	28,20	-1253	1224	-29					
39,75	28,70	-1222	1237	15					
39,25	29,20	-1250	1208	-42					
38,75	29,70	-1196	1097	-99					
38,25	30,20	-1341	1393	52					
37,75	30,70	-1336	1195	-141					
37,25	31,20	-1333	931	-402					
36,75	31,70	-1361	857	-504					1332
36,25	32,20	-1315	1286	-29	-46	-429			
35,75	32,70	-1343	1314	-29					
35,25	33,20	-1351	1407	56					
34,75	33,70	-1564	1535	-29					
34,25	34,20	-1573	1578	5					
33,75	34,70	-1437	1489	52					
ITERAÇÃO 4									
40,25	28,20	-1253	1224	-29					
39,75	28,70	-1222	1237	15					
39,25	29,20	-1250	1208	-42					
38,75	29,70	-1196	1097	-99					
38,25	30,20	-1341	1393	52					
37,75	30,70	-1336	1195	-141					
37,25	31,20	-1333	931	-402					
36,75	31,70	-1361	1332	-29	28	-401			1304
36,25	32,20	-1315	1286	-29					
35,75	32,70	-1343	1314	-29					
35,25	33,20	-1351	1407	56					
34,75	33,70	-1564	1535	-29					
34,25	34,20	-1573	1578	5					
33,75	34,70	-1437	1489	52					

A campanha 23-VII é um caso diferente, cuja correção não é possível devido à forma como se pensa que o processo de desenchalhamento poderá ocorrer.

Na figura A63 apresentam-se os perfis de somas de leituras desta campanha. Ao contrário do que acontece na campanha 23-1DG-A (figura A62), o desvio do valor médio das somas não se verifica.

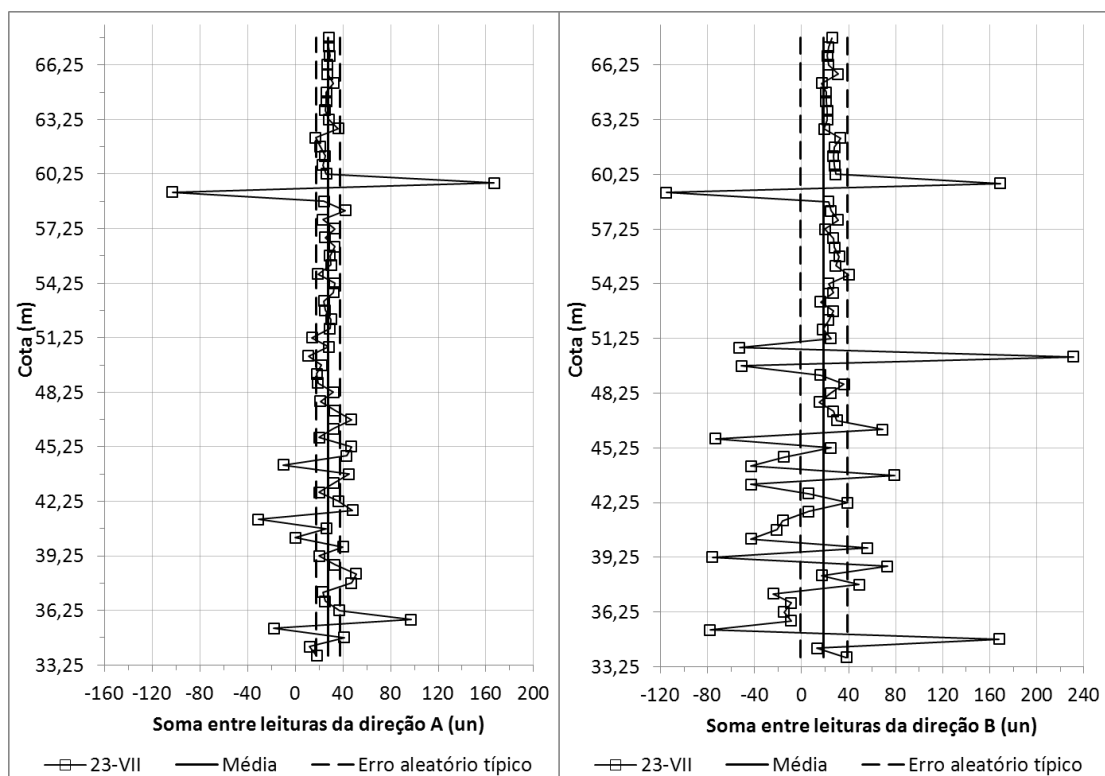


Figura A63 – Tubo R0, campanha 23-VII. Perfil de somas de leituras nas direções *A* e *B*.

No quadro A49 apresenta-se um resumo dos procedimentos de análise das leituras da campanha 23-VII, entre as cotas 33,75 *m* e 42,75 *m*. Os métodos aplicados baseiam-se nas equações (121) (6.4.7) e (93)<sup>1</sup> (6.4.2). Neste quadro observa-se o seguinte:

- As secções em que o erro é identificado diferem entre os dois métodos. Este facto é esperado, visto existirem secções sequenciais afetadas e, por isso, a equação (121) (6.4.7) só pode ser aplicada iterativamente (in ex.: não produz informação credível porque se baseia na diferença entre secções contíguas).
- A equação (93) (6.4.2) identifica erros muito significativos em ambos os sentidos, praticamente em todas as secções analisadas. Este facto torna inviável a aplicação da equação (121) (6.4.7), mesmo de forma iterativa, uma vez que esta equação pressupõe que uma das leituras esteja isenta de erro.
- A condição  $|\Delta l_i - \Delta b| \leq \varepsilon_a$  é inválida mesmo em secções onde o erro não é identificado pela equação (93) (6.4.2). Este facto explica-se considerando que o desencalhamento da sonda provoca uma rotação axial da mesma idêntica em ambos os sentidos de leitura. Desta forma, os ângulos medidos em ambos os sentidos são aproximadamente simétricos e a condição  $|\Delta l_i^0 + \Delta l_i^{180} - 2\Delta b| \leq \varepsilon_a$  é validada, apesar da sonda circular fora das calhas de rotação.

<sup>1</sup> Note-se que mesmo a campanha 23-VII comporta um erro de rotação na direção *B*. Pois, o acelerómetro utilizado nesta direção foi o da direção *A*, enquanto os dados homólogos da campanha de referência foram obtidos com o acelerómetro da direção *B*. Por esta razão, a equação (92) (6.4.2) não é adequada à análise de dados, uma vez que pressupõe a inexistência de deslocamentos.

Quadro A49 – Tubo R0, campanha 23-VII. Análise de leituras pelas equações (121) (6.4.7) e (93) (6.4.2), entre as cotas 33,75 m e 42,75 m.

Cota (m)	Índice <i>i</i>	Eixo B ( $\mu_p = 18,97$ un)			$l_{i+1} - l_i = \Delta l_i$			$l_{p,i} - l_{r,i} = \Delta l_i$		$\sum \Delta l_i$ $- 2\Delta b$	$\Delta l_i - \Delta b$	
		0º	180º	Soma	0º	180º	Soma	0º	180º		0º	180º
42,75	19	-755	761	6	-	-	-	356	-360	-15	350	-366
42,25	18	-640	679	39	-115	82	-33	483	-448	24	477	-454
41,75	17	-523	529	6	-117	150	33	597	-605	-19	591	-611
41,25	16	-646	630	-16	123	-101	22	603	-625	-33	597	-631
40,75	15	-564	543	-21	-82	87	5	675	-702	-38	669	-708
40,25	14	-581	538	-43	17	5	22	632	-684	-63	626	-690
39,75	13	-530	586	56	-51	-48	-99	696	-656	29	690	-662
39,25	12	-597	521	-76	67	65	132	600	-692	-103	594	-698
38,75	11	-703	776	73	106	-255	-149	483	-414	58	477	-420
38,25	10	-892	909	17	189	-133	56	401	-387	3	395	-393
37,75	9	-943	992	49	51	-83	-32	363	-329	23	357	-335
37,25	8	-917	893	-24	-26	99	73	380	-423	-54	374	-429
36,75	7	-835	826	-9	-82	67	-15	465	-483	-29	459	-489
36,25	6	-785	770	-15	-50	56	6	492	-524	-43	486	-530
35,75	5	-817	808	-9	32	-38	-6	466	-474	-19	460	-480
35,25	4	-1195	1117	-78	378	-309	69	230	-321	-102	224	-327
34,75	3	-1384	1552	168	189	-435	-246	53	113	155	47	107
34,25	2	-1439	1452	13	55	100	155	26	-15	0	20	-21
33,75	1	-1440	1478	38	1	-26	-25	31	-10	10	25	-16

Analisando-se os diferentes métodos de correção apresentados em 6.4.2 e em 6.4.7, percebe-se porque esta campanha não é passível de ser corrigida de forma credível:

- A equação (121) (6.4.7) apoia-se no valor de  $\mu_p$  e na leitura do sentido oposto ao afetado. Se ambas as leituras forem de muito má qualidade, este método não se aplica.
- A equação (93) (6.4.2) apoia-se essencialmente na discrepância entre deslocamentos de sentidos opostos, supostamente simétricos. Se ambas as leituras forem de muito má qualidade e produzirem deslocamentos erróneos de magnitude considerável, este método não é aplicável, principalmente se houver simetria entre leituras de sentidos opostos.
- A equação (92) (6.4.7) apoia-se no pressuposto de não existirem deslocamentos significativos na zona analisada (in ex.: o método equivale à subtração de deslocamentos). Sabendo-se que existe um erro de rotação que produz deslocamentos, este método não se aplica.

A análise das campanhas 23-1DG-A e 23-VII demonstra que as técnicas introduzidas neste documento permitem recuperar informação com um elevado grau de corrupção, desde que haja alguma fiabilidade dos dados recolhidos num dos sentidos. Demonstra-se ainda que estes métodos não devem ser aplicados no imediato, por tentativa e erro, sem primeiro se verificarem as condições necessárias à sua aplicação com algum grau de confiança. Pequenos erros pontuais e isolados podem normalmente corrigir-se sem grande dificuldade. Mas, quando este tipo de erro ocorre sequencialmente com magnitudes importantes é preferível repetir a campanha.



## ANEXO XII: ESTIMATIVA DO ERRO EM CURVAS DE PERFIL

### Introdução

Na secção 6.5 abordam-se os procedimentos de cálculo para estimativa do erro em curvas de perfil. Na secção 6.2 refere-se que a estimativa do erro afeto a curvas de deslocamento incremental e acumulado se calcula de acordo com as expressões (78) e (79) (6.2.2):

$$\Delta d_{p,i} = L\Delta m_i \pm \sqrt{k}\varepsilon_a + k\varepsilon_s$$
$$\Delta D_{p,j} = L \sum_i^j \Delta m_i \pm \sqrt{kn}\varepsilon_a + kn\varepsilon_s; n = j - i + 1$$

Considerando-se uma única referência (in ex.:  $k = 1$ ), o erro aleatório dum deslocamento incremental com base no erro típico do sistema corresponde a  $\pm\varepsilon_a$  e a mesma componente dum deslocamento acumulado corresponde a  $\pm\sqrt{n}\varepsilon_a$ , sendo  $n$  índice da secção correspondente.

Quando são introduzidos erros sistemáticos, estes têm de ser acumulados linearmente em cada secção onde ocorrem, podendo a sua magnitude estimar-se pela expressão<sup>1</sup> (118) (6.4.7):

$$|\varepsilon_{s,i}| \cong |S_i - \mu|/2$$

Por exemplo, considere-se que na secção  $i = 52$  estima-se um erro sistemático com magnitude  $|\varepsilon_s| = 100 \text{ un.}$  Então, o erro dos deslocamentos incrementais nas secções não afetadas é  $\Delta d_{i=[1:51]; [53:n]} = \pm\varepsilon_a$  e na secção  $i = 52$  é  $\Delta d_{52} = \pm|\varepsilon_a + \varepsilon_s| = \pm(\varepsilon_a + 100) \text{ un.}$  Note-se que o método não faz juízo sobre o sentido<sup>2</sup> onde o erro ocorre, partindo-se do princípio que o mesmo pode ocorrer no sentido positivo ou negativo. Note-se ainda que a componente aleatória é incrementada a  $\varepsilon_s$ , uma vez que qualquer medição é passível de variar aleatoriamente, independentemente de conter um erro sistemático.

Seguindo-se o mesmo exemplo, o erro dos deslocamentos acumulados nas secções  $i < 52$  é  $D_{i=[1:51]} = \pm\sqrt{i}\varepsilon_a$  e o erro nas secções  $i \geq 52$  é  $D_{i=[52:n]} = \pm(\sqrt{i}\varepsilon_a + 100) \text{ un.}$  Note-se que a componente sistemática não é acumulada nas secções  $i > 52$  porque só ocorre na secção  $i = 52$ . É importante reter que o termo  $n\varepsilon_s$  das equações (79) (6.2.2) e (76) (6.2.1) pressupõe a existência de  $\varepsilon_s$  em todas as secções; pois são genéricas e exprimem o valor máximo (ou admissível) do erro típico do sistema. Uma forma mais prática de escrever a expressão (79) (6.2.2) é:

<sup>1</sup> Note-se que esta expressão é a recomendada para a estimativa da magnitude de erros sistemáticos pontuais (6.4.7), mas existem outras metodologias de estimativa que podem ser utilizadas em situações específicas (6.4.2; 6.4.7).

<sup>2</sup> Nas secções 6.4.2 e 6.4.7 apresentam-se algumas metodologias para determinar o sentido em que o erro provavelmente ocorre. No entanto, estes métodos requerem uma análise mais aprofundada e objetivam a correção efetiva do erro. Aqui, pretende-se um método expedito que forneça uma aproximação da magnitude do erro.

$$\Delta D_{p,i} = L \sum_i^j \Delta m_i \pm \sqrt{kn} \varepsilon_a + \sum_k \sum_i^j \varepsilon_{s,k,i}; \quad n = j - i + 1$$

Ou seja, o erro sistemático na secção  $j$  da campanha  $p$  corresponde ao somatório dos erros sistemáticos verificados nas secções  $i \leq j$ , em cada histórico de referências  $k$ . Convém não esquecer que os históricos de referências  $k > 1$  não incluem apenas as campanhas de referência  $k$ , havendo sempre uma campanha de transição entre históricos (5.6). Convém também lembrar que o erro aleatório da campanha de referência é desprezável, por se tratar de um padrão, mas este procedimento não é válido para erros sistemáticos, a não ser que estes sejam repetíveis ao longo do histórico de observação.

Portanto, o sistema de múltiplas referências pode ser muito útil, mas deve utilizar-se com algum critério e considerando-se sempre as implicações que várias referências podem ter na avaliação da qualidade das medições inclinométricas.

#### **Estimativas do erro nas curvas de deslocamento das campanhas 45 e 51 (6.5; Anexo XI)**

Nos quadros A50 e A51 apresentam-se as medições inclinométricas das campanhas 45 e 51 na direção  $B$ , respetivamente, juntamente com as estimativas dos erros de medição respetivos. As estimativas da componente aleatória apresentam-se:

- a) baseadas em  $\varepsilon_a$ , com  $\varepsilon_a^A = \mu^A \pm 10 \text{ un}$  ( $\mu^A \pm 0,2 \text{ mm}$ ) e  $\varepsilon_a^B = \mu^B \pm 2\varepsilon_a^A \text{ un}$ ;
- b) baseados em  $s$ , com  $\varepsilon_a^A = \mu^A \pm s \text{ un}$  e  $\varepsilon_a^B = \mu^B \pm 2s \text{ un}$ , sendo  $s$  o desvio padrão das somas de leituras com exclusão das somas desviantes (6.5.1).

Os erros sistemáticos são primeiramente identificados pelo método *a)*, sendo a sua magnitude posteriormente estimada através da expressão (118) (6.4.7) com o valor de  $\mu$  recalculado sem as somas desviantes previamente identificadas.

A componente aleatória do erro total é estimada pelo método *a)* ou *b)*. Embora o método *b)* resulte frequentemente em estimativas inferiores, o método *a)* é normalmente preferível porque define intervalos de confiança padrão e facilita a comparação qualitativa entre campanhas com dispersões de somas distintas entre si.

As estimativas obtidas nos quadros A50 e A51 correspondem à metade superior do quadro 22 (6.5.1). Por uma questão de brevidade, não serão apresentados os procedimentos de cálculo da direção  $A$ , já que não diferem dos aplicados na direção  $B$ . Os valores da metade inferior do quadro 22 (6.5.1) calculam-se da mesma forma, tomando os valores típicos de  $\varepsilon_a^A = \pm 10 \text{ un}$ ,  $\varepsilon_a^B = \pm 20 \text{ un}$  e  $\varepsilon_s = \pm 5 \text{ un}$  em ambas as direções. O coeficiente de conversão entre unidades de leitura e milímetros é 0,02.

Quadro A50-1 – Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro da campanha 45 na direção B  
– continua na próxima página.

Tubo:	I1	Obra: MERCEANA - ESCOLA PREPARAT		Eixo B		Estimativa baseada no erro típico		Estimativa baseada em s		
Camp.:	45	2001-09-17	Desvio padrão (s):		8,49					
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:		3,49		ε <sub>a</sub> + ε <sub>s</sub>  ; ε <sub>a</sub> = ±0,4 [mm]		ε <sub>a</sub> + ε <sub>s</sub>  ; ε <sub>a</sub> = ±s [mm]	
Cota	Índice	Eixo B			Erro sist. (ε <sub>s</sub> , mm)					
(m)	i	0°	180°	Soma	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.
132,74	39	-204	473	269	0,00	2,24	0,40	4,74	0,17	3,30
132,24	38	-225	467	272	0,00	2,24	0,40	4,70	0,17	3,28
131,74	37	Desvio padrão calculado sem as secções 6, 10, 11, 17 e 18.			0,00	2,24	0,40	4,67	0,17	3,27
131,24	36	-179	459	280	0,00	2,24	0,40	4,64	0,17	3,26
130,74	35	22	269	291	0,00	2,24	0,40	4,60	0,17	3,24
130,24	34	80	197	277	0,00	2,24	0,40	4,57	0,17	3,23
129,74	33	106	170	276	0,00	2,24	0,40	4,54	0,17	3,21
129,24	32	122	154	276	0,00	2,24	0,40	4,50	0,17	3,20
128,74	31	138	148	286	0,00	2,24	0,40	4,47	0,17	3,18
128,24	30	136	134	270	0,00	2,24	0,40	4,43	0,17	3,17
127,74	29	109	167	276	0,00	2,24	0,40	4,39	0,17	3,15
127,24	28	151	127	278	0,00	2,24	0,40	4,35	0,17	3,14
126,74	27	147	131	278	0,00	2,24	0,40	4,32	0,17	3,12
126,24	26	153	120	273	0,00	2,24	0,40	4,28	0,17	3,10
125,74	25	152	122	274	0,00	2,24	0,40	4,24	0,17	3,09
125,24	24	172	111	283	0,00	2,24	0,40	4,20	0,17	3,07
124,74	23	255	34	289	0,00	2,24	0,40	4,16	0,17	3,05
124,24	22	319	-39	280	0,00	2,24	0,40	4,11	0,17	3,03
123,74	21	328	-43	285	0,00	2,24	0,40	4,07	0,17	3,02
123,24	20	328	-45	283	0,00	2,24	0,40	4,03	0,17	3,00
122,74	19	372	-68	304	0,00	2,24	0,40	3,98	0,17	2,98
122,24	18	389	-78	311	0,29	2,24	0,69	3,93	0,46	2,96
121,74	17	521	-117	404	1,22	1,95	1,62	3,59	1,39	2,65
121,24	16	432	-144	288	0,00	0,72	0,40	2,32	0,17	1,40
120,74	15	450	-162	288	0,00	0,72	0,40	2,27	0,17	1,38
120,24	14	450	-162	288	0,00	0,72	0,40	2,27	0,17	1,36
119,74	13	450	-162	288	0,00	0,72	0,40	2,16	0,17	1,33
119,24	12	472	-190	282	0,00	0,72	0,40	2,11	0,17	1,31
118,74	11	296	12	308	0,26	0,72	0,66	2,05	0,43	1,29
118,24	10	389	-82	307	0,25	0,46	0,65	1,72	0,42	1,00
117,74	9	405	-103	302	0,00	0,21	0,40	1,41	0,17	0,72
117,24	8	421	-144	277	0,00	0,21	0,40	1,34	0,17	0,69
116,74	7	453	-162	291	0,00	0,21	0,40	1,27	0,17	0,66
116,24	6	460	-199	261	0,21	0,21	0,61	1,19	0,38	0,62
115,74	5	567	-295	272	0,00	0,00	0,40	0,89	0,17	0,38

O erro sistemático é estimado a partir da média parcial (in ex.: |S<sub>i</sub> - (281,74)|/2 [mm])

Somas desviantes da média total (S<sub>i</sub> < μ - 20 ou S<sub>i</sub> > μ + 20)



Quadro A50-2 – Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro da campanha 45 na direção B – continuação.

115,24	4	611	-317	294	0,00	0,00	0,40	0,80	0,17	0,34
114,74	3	590	-309	281	0,00	0,00	0,40	0,69	0,17	0,29
114,24	2	597	-322	275	0,00	0,00	0,40	0,57	0,17	0,24
113,74	1	581	-306	275	0,00	0,00	0,40	0,40	0,17	0,17
Média total:				286,41	Média calculada com todas as somas.					
Média parcial:				281,74	Média sem somas desviantes (secções 6, 10, 11, 17 e 18).					

Quadro A51-1 – Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro da campanha 51 na direção B – continua na próxima página.

Tubo:	I1	Obra:	MERCEANA - ESCOLA PREPARAT	Eixo B	Estimativa baseada no erro típico		Estimativa baseada em s	
Camp.:	51	2002-09-17	Desvio padrão (s):	5,88	$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm 0,4 [mm]$		$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm s [mm]$	
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:	3,49				
Cota	Índice	Eixo B			Erro sist. ( $\varepsilon_s$ , mm)			
(m)	i	0°	180°	Soma	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.
132,74	39	-47	349	302	0,00	1,85	0,40	4,35
132,24	38	-66	364	298	0,00	1,85	0,40	4,32
131,74	37	-85	379	294	0,00	1,85	0,40	4,28
131,24	36	-22	326	304	0,00	1,85	0,40	4,25
130,74	35	89	213	302	0,00	1,85	0,40	4,22
130,24	34	105	194	299	0,00	1,85	0,40	4,18
129,74	33	118	177	295	0,00	1,85	0,40	4,15
129,24	32	128	168	296	0,00	1,85	0,40	4,11
128,74	31	138	149	287	0,17	1,85	0,57	4,08
128,24	30	149	143	292	0,00	1,68	0,40	3,87
127,74	29	127	185	312	0,00	1,68	0,40	3,84
127,24	28	160	141	301	0,00	1,68	0,40	3,80
126,74	27	159	143	302	0,00	1,68	0,40	3,76
126,24	26	167	134	301	0,00	1,68	0,40	3,72
125,74	25	162	137	299	0,00	1,68	0,40	3,68
125,24	24	184	123	307	0,00	1,68	0,40	3,64
124,74	23	263	43	306	0,00	1,68	0,40	3,60
124,24	22	331	-27	304	0,00	1,68	0,40	3,56
123,74	21	342	-36	306	0,00	1,68	0,40	3,51
123,24	20	342	-36	306	0,00	1,68	0,40	3,47
122,74	19	365	-59	306	0,00	1,68	0,40	3,43
122,24	18	374	-68	306	0,00	1,68	0,40	3,38
121,74	17	411	-109	302	0,00	1,68	0,40	3,33
121,24	16	449	-132	317	0,00	1,68	0,40	3,28
120,74	15	487	-155	332	0,00	1,68	0,40	3,23
120,24	14	458	-147	311	0,00	1,68	0,40	3,18
119,74	13	466	-164	302	0,00	1,68	0,40	3,12
119,24	12	479	-174	305	0,00	1,68	0,40	3,07
118,74	11	293	-19	312	0,00	1,68	0,40	3,01

Desvio padrão calculado sem as secções 1, 2, 3 e 31.

Somas desviantes da média total ( $S_5 < \mu - 20$  ou  $S_5 > \mu + 20$ )

O erro sistemático é estimado a partir da média parcial (in ex.:  $|S_5 - (303,94)|/2 [mm]$ )

Quadro A51-2 – Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro da campanha 51 na direção *B* – *continuação*.

118,24	10	382	-73	309	0,00	1,68	0,40	2,95	0,12	2,05
117,74	9	397	-94	303	0,00	1,68	0,40	2,88	0,12	2,03
117,24	8	430	-128	302	0,00	1,68	0,40	2,81	0,12	2,01
116,74	7	451	-155	296	0,00	1,68	0,40	2,74	0,12	1,99
116,24	6	489	-184	305	0,00	1,68	0,40	2,66	0,12	1,97
115,74	5	583	-281	302	0,00	1,68	0,40	2,58	0,12	1,94
115,24	4	624	-307	317	0,00	1,68	0,40	2,48	0,12	1,92
114,74	3	604	-242	362	0,58	1,68	0,98	2,37	0,70	1,89
114,24	2	615	-254	361	0,57	1,10	0,97	1,67	0,69	1,27
113,74	1	592	-235	357	0,53	0,53	0,93	0,93	0,65	0,65
Média total:				307,82	Média calculada com todas as somas.					
Média parcial:				303,94	Média sem somas desviantes (secções 1, 2, 3 e 31).					

Nas figuras A64 e A65 apresentam-se, respetivamente, as curvas de deslocamento incremental e acumulado das campanhas 45 e 51 na direção *B*. Nestas figuras apresentam-se também os limites de confiança correspondentes ao erro estimado nos quadros A50 e A51.

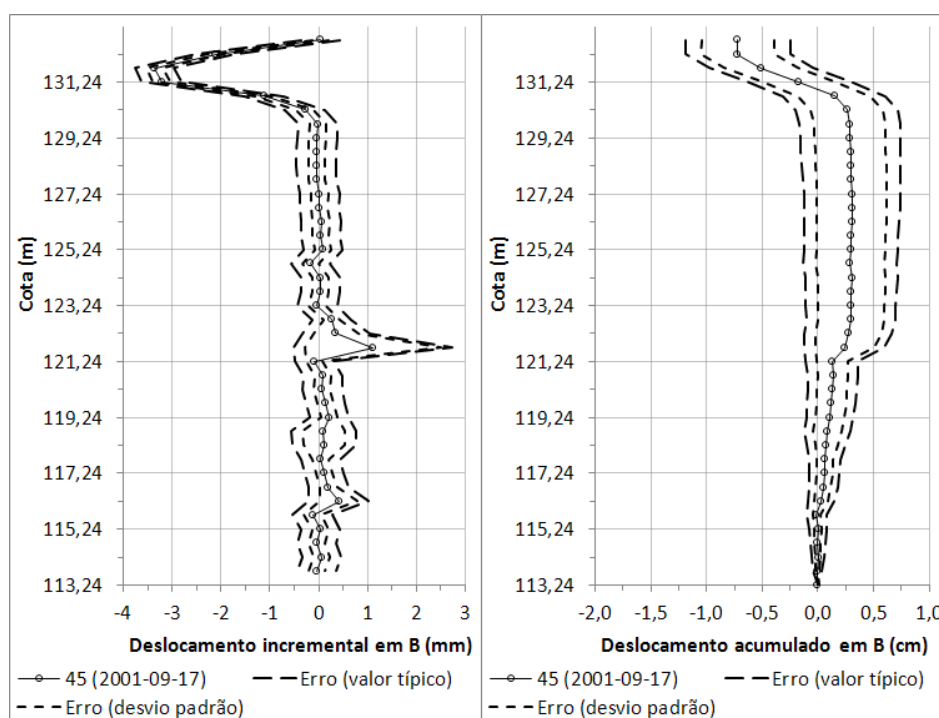


Figura A64 – Curvas de deslocamentos com estimativas de erro da campanha 45 na direção *B*.

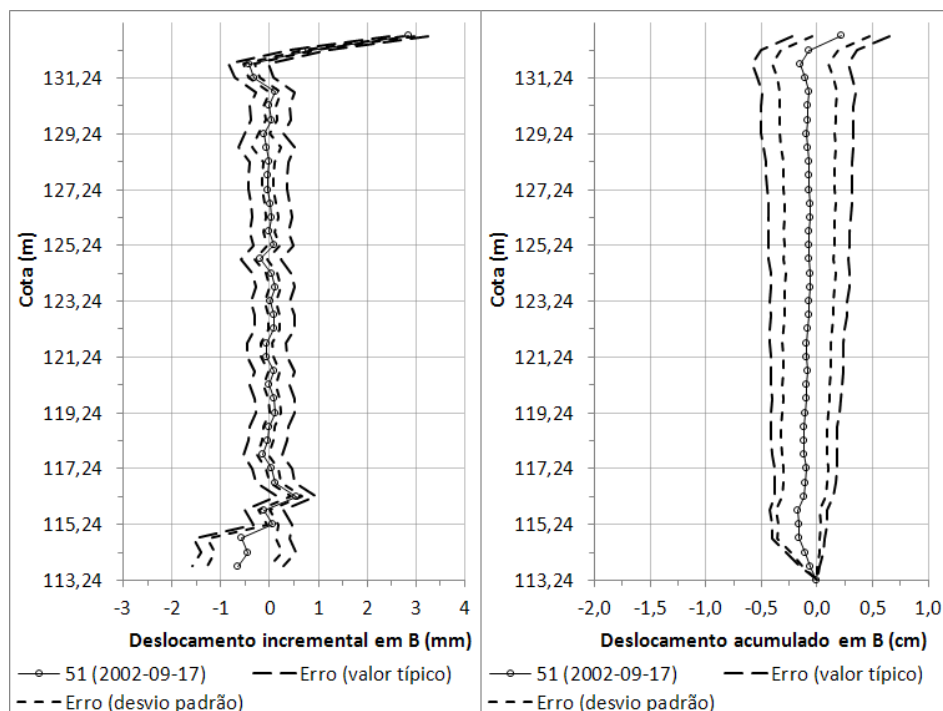


Figura A65 – Curvas de deslocamentos com estimativas de erro da campanha 51 na direção B.

Após correção dos erros conforme exposto na secção 6.4.7 e no Anexo XI, as secções corrigidas<sup>1</sup> através da equação (121) (6.4.7) têm um erro aleatório estimado de  $\sqrt{2}\varepsilon_a$  ou de  $\sqrt{s^2 + \varepsilon_a^2}$ , conforme a estimativa se baseie no valor típico ou no valor do desvio padrão ( $s$ ), respetivamente ((130), 6.5.2).

Nos quadros A52 e A53 resumem-se os procedimentos de cálculo das estimativas de erro após a aplicação das correções do Anexo XI nas campanhas 45 e 51, respetivamente. As representações gráficas respetivas encontram-se nas figuras A66 e A67.

Quadro A52-1 – Resultados das correções da campanha 45 apresentadas no Anexo XI. Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro na direção B – *continua na próxima página*.

Tubo:	I1	Obra:	MERCEANA - ESCOLA PREPARAT	Eixo B	Estimativa baseada		Estimativa baseada	
Camp.:	45	2001-09-17	Desvio padrão ( $s$ ):	7,57	no erro típico		em $s$	
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:	3,49	$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm 0,4 [mm]$		$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm s [mm]$	
Cota	Índice	Eixo B			Erro sist. ( $\varepsilon_s$ , mm)			
(m)	$i$	0°	180°	Soma	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.
132,74	39	-204	473	269	0,00	1,25	0,40	3,78
132,24	38	-225	497	272	0,00	1,25	0,40	3,75

<sup>1</sup> Secção 17 na campanha 45 e secções 1 a 3 na campanha 51.

Quadro A52-2 – Resultados das correções da campanha 45 apresentadas no Anexo XI. Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro na direção B – *continuação*.

131,74	37	-212	490	278	0,00	1,25	0,40	3,72	0,15	2,26
131,24	36	-179	459	280	0,00	1,25	0,40	$\sum \epsilon_s$	0,15	$\sum \epsilon_s$
130,74	35	22	269	291	0,00	1,25	0,40	3,65	0,15	2,23
130,24	34	80	197	277	0,00	1,25	0,40	$\sum \epsilon_s$	0,15	$\sum \epsilon_s$
129,74	33	106	170	276	0,00	1,25	0,40	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$	0,15	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$
129,24	32	122	154	276	0,00	1,25	0,40	3,55	0,15	2,20
128,74	31	138	148	286	0,00	1,25	0,40	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$	0,15	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$
128,24	30	136	134	270	0,00	1,25	0,40	3,52	0,15	2,19
127,74	29	109	167	276	0,00	1,25	0,40	$\sum \epsilon_s$	0,15	$\sum \epsilon_s$
127,24	28	151	127	278	0,00	1,25	0,40	3,44	0,15	2,16
126,74	27	147	131	278	0,00	1,25	0,40	3,41	0,15	2,15
126,24	26	153	120	273	0,00	1,25	0,40	3,37	0,15	2,14
125,74	25	152	122	274	0,00	1,25	0,40	3,33	0,15	2,12
125,24	24	172	111	283	0,00	1,25	0,40	3,29	0,15	2,11
124,74	23	255	34	289	0,00	1,25	0,40	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$	0,15	2,10
124,24	22	222	22	280	0,00	1,25	0,40	3,21	0,15	2,08
123,74	21	328	-43	285	0,00	1,25	0,40	$\sum \epsilon_s$	0,15	2,07
123,24	20	328	-45	283	0,00	1,25	0,40	3,17	0,15	2,05
122,74	19	372	-68	304	0,23	1,25	0,63	3,09	0,15	2,04
122,24	18	389	-78	311	0,30	1,03	0,70	3,04	0,38	2,03
121,74	17	403	-117	286	0,00	0,73	0,57	2,77	0,45	1,78
121,24	16	432	-144	288	0,00	0,73	0,40	2,42	0,15	1,33
120,74	15	450	-162	288	0,00	0,73	0,40	2,33	0,15	1,31
120,24	14	450	-162	288	0,00	0,73	0,40	2,28	0,15	1,31
119,74	13	461	-173	288	0,00	0,73	0,40	2,22	0,15	1,29
119,24	12	472	-190	282	0,00	0,73	0,40	2,17	0,15	1,27
118,74	11	296	12	308	0,27	0,73	0,67	2,11	0,15	1,25
118,24	10	389	-82	307	0,26	0,46	0,66	$\sum \epsilon_s$	0,42	$\sum \epsilon_s$
117,74	9	405	-103	302	0,00	0,20	0,40	2,05	0,15	1,23
117,24	8	421	-144	277	0,00	0,20	0,40	1,77	0,15	1,20
116,74	7	453	-162	291	0,00	0,20	0,40	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$	0,15	$\sqrt{(i-1)s^2 + s_a^2} + \epsilon_s$
116,24	6	460	-199	261	0,20	0,20	0,60	1,76	0,15	0,80
115,74	5	567	-295	272	0,00	0,00	0,40	1,18	0,35	0,57
115,24	4	611	-317	294	0,00	0,00	0,40	0,89	0,15	0,34
114,74	3	590	-309	281	0,00	0,00	0,40	0,80	0,15	0,30
114,24	2	597	-322	275	0,00	0,00	0,40	0,69	0,15	0,26
113,74	1	581	-306	275	0,00	0,00	0,40	0,57	0,15	0,21
Média total:				283,38						
Média parcial:				281,21						

Quadro A53-1 – Resultados das correções da campanha 51 apresentadas no Anexo XI. Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro na direção *B* – *continua na próxima página*.

Tubo:	I1	Obra: MERCEANA - ESCOLA PREPARAT		Eixo B		Estimativa baseada no erro típico		Estimativa baseada em s		
Camp.:	51	2002-09-17	Desvio padrão (s):	6,30						
Ref.:	1	1996-12-27	Desvio padrão:	3,49		$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm 0,4 [mm]$		$ \varepsilon_a + \varepsilon_s ; \varepsilon_a = \pm s [mm]$		
Cota	Índice	Eixo B			Erro sist. (εs, mm)					
(m)	i	0°	180°	Soma	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.	Increment.	Acumul.
132,74	39	-47	349	302	0,00	0,00	0,40	2,59	0,13	1,05
132,24	38	-66	364	298	0,00	0,00	0,40	2,56	0,13	1,04
131,74	37	-55	353	298	0,00	0,00	0,40	2,53	0,13	1,03
131,24	36	-22	326	304	0,00	0,00	0,40	2,50	0,13	1,03
130,74	35	89	213	302	0,00	0,00	0,40	2,47	0,13	1,02
130,24	34	105	194	299	0,00	0,00	0,40	2,43	0,13	1,01
129,74	33	118	177	295	0,00	0,00	0,40	2,40	0,13	1,00
129,24	32	128	168	296	0,00	0,00	0,40	$\sum \varepsilon_s$ 2,37	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,99
128,74	31	138	149	287	0,00	0,00	0,40	2,33	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,99
128,24	30	149	143	292	0,00	0,00	0,40	$\sum \varepsilon_s$ 2,30	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,98
127,74	29	127	185	312	0,00	0,00	0,40	2,26	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,97
127,24	28	160	141	301	0,00	0,00	0,40	2,23	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,96
126,74	27	159	143	302	0,00	0,00	0,40	2,19	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,95
126,24	26	167	134	301	0,00	0,00	0,40	2,17	0,13	$\sum \varepsilon_s$ 0,95
125,74	25	162	137	299	0,00	0,00	0,40	2,12	0,13	0,94
125,24	24	184	123	307	0,00	0,00	0,40	2,08	0,13	0,93
124,74	23	263	43	306	0,00	0,00	0,40	2,04	0,13	0,92
124,24	22	331	-27	304	0,00	0,00	0,40	2,00	0,13	0,91
123,74	21	342	-36	306	0,00	0,00	0,40	1,96	0,13	0,90
123,24	20	342	-36	306	0,00	0,00	0,40	1,92	0,13	0,89
122,74	19	365	-59	306	0,00	0,00	0,40	1,88	0,13	0,88
122,24	18	374	-68	306	0,00	0,00	0,40	1,83	0,13	0,88
121,74	17	411	-109	302	0,00	0,00	0,40	1,79	0,13	0,87
121,24	16	449	-132	317	0,00	0,00	0,40	1,74	0,13	0,86
120,74	15	463	-150	313	0,00	0,00	0,40	1,70	0,13	0,85

Quadro A53-2 – Resultados das correções da campanha 51 apresentadas no Anexo XI. Resumo dos procedimentos de cálculo da estimativa do erro na direção *B* – *continuação*.

120,24	14	458	-147	311	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,55	0,13	0,84
119,74	13	466	-164	302	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,50	0,13	0,83
119,24	12	479	-174	305	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,44	0,13	0,82
118,74	11	293	19	312	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,39	0,13	0,81
118,24	10	382	-73	309	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,33	0,13	0,80
117,74	9	397	-94	303	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,26	0,13	0,79
117,24	8	430	-128	302	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,20	0,13	0,78
116,74	7	451	-155	296	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,13	0,13	0,77
116,24	6	489	-184	305	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,06	0,13	0,76
115,74	5	583	-281	302	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,06	0,13	0,75
115,24	4	624	-307	317	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,40	1,06	0,13	0,74
114,74	3	604	-296	308	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,57	0,98	0,42	0,73
114,24	2	615	-307	308	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,57	0,80	0,42	0,59
113,74	1	592	-284	308	$\sqrt{(i-1)s^2 + \epsilon_a^2 + s^2} + \sum \epsilon_s$	0,00	0,00	0,57	0,57	0,42	0,42
Média total:				303,82							
Média parcial:				303,82							

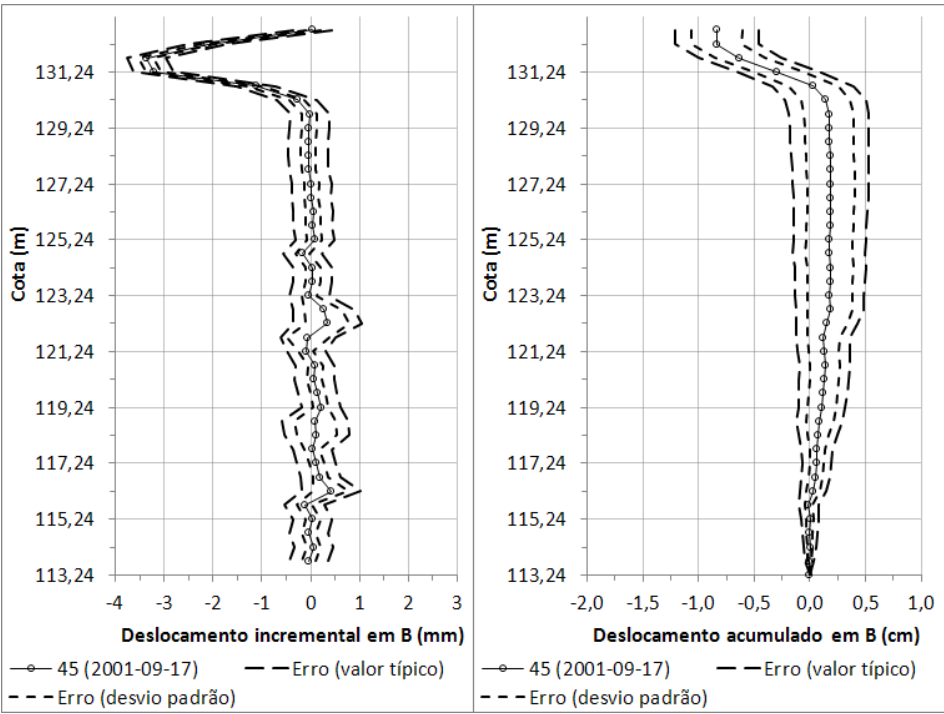


Figura A66 – Resultados das correções da campanha 45 apresentadas no Anexo XI. Curvas de deslocamentos com estimativas de erro na direção *B*.

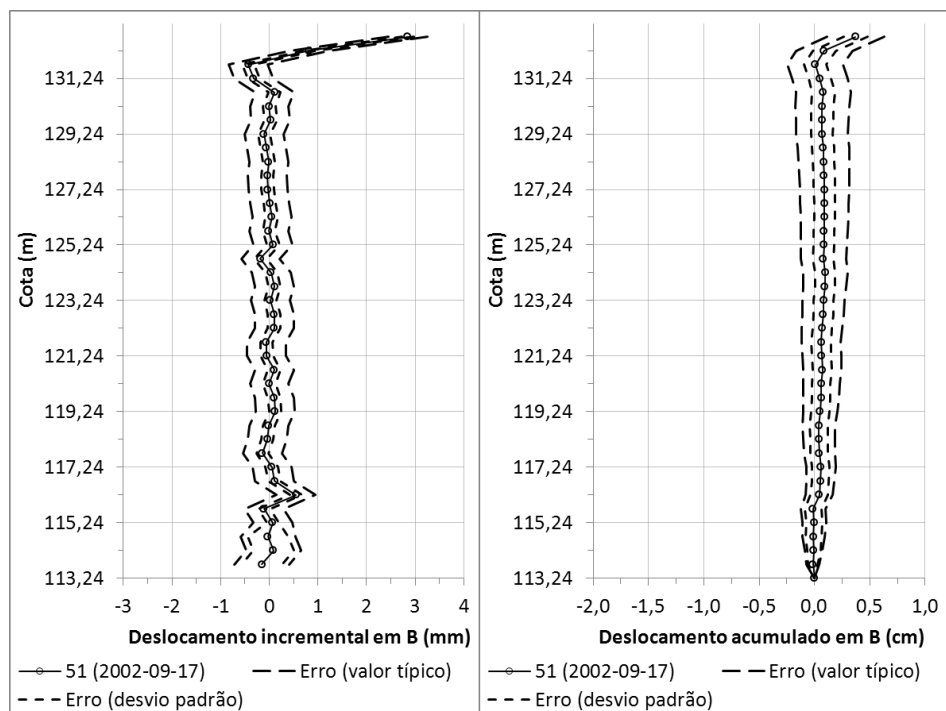


Figura A67 – Resultados das correções da campanha 51 apresentadas no Anexo XI. Curvas de deslocamentos com estimativas de erro na direção *B*.